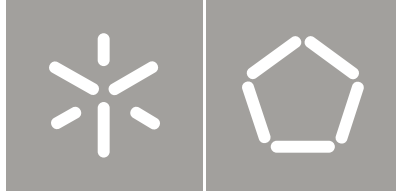


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Ivan de Medeiros

Estudo do Comportamento de Estruturas
Fibrosas com Base em Materiais com
Memória de Forma e Elastómeros



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Ivan de Medeiros

Estudo do Comportamento de Estruturas
Fibrosas com Base em Materiais com
Memória de Forma e Elastómeros

Tese de Doutoramento
Engenharia Têxtil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Raúl Manuel Esteves Sousa Figueiro

DECLARAÇÃO

Nome: José Ivan de Medeiros

Endereço electrónico: ivanmedeiros@sapo.pt

Telefone: 351 916266953

Número do Passaporte: CY727155

Título dissertação /tese Estudo do Comportamento de Estruturas Fibrosas com Base em Materiais com Memória de Forma e Elastómeros

Orientador: Prof. Dr. Raúl Manuel Esteves Sousa Figueiro

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento: Engenharia Têxtil

Nos exemplares das teses de doutoramento ou de mestrado ou de outros trabalhos entregues para prestação de provas públicas nas universidades ou outros estabelecimentos de ensino, e dos quais é obrigatoriamente enviado um exemplar para depósito legal na Biblioteca Nacional e, pelo menos outro para a biblioteca da universidade respectiva, deve constar uma das seguintes declarações:

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura: _____

À Nilde, Renato e Gustavo

Agradecimentos

Inicialmente, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Raul Manuel Esteves Sousa Figueiro, que não mediu esforços para a concretização desta obra. Conduzido por grande sapiência pôde me dar sugestões, conselhos e infinito apoio no sentido de que o melhor fosse feito.

Ao Professor e amigo Doutor Mário de Araújo, pelo incentivo para a elaboração deste trabalho, bem como pelos ensinamentos, conselhos e pela disposição ao longo da minha vivência em Portugal.

Em nome do amigo Mestre Joaquim Jorge Peixoto, técnico do Laboratório de Engenharia Têxtil, agradeço aos demais técnicos desta Universidade pela gentileza e auxílio prestado durante a realização deste trabalho.

Aos amigos Juliana Cruz, e Felipe Soutinho pela ajuda e contribuição em algumas tarefas deste árduo trabalho.

A todos os colegas de doutoramento: Ângela Sá, Alexandre Ferreira, Fernando Ribeiro, Fernanda Steffens, Heriberto, Quyen, Clécio de Lacerda, Etienne Amorim, Dorin Ionese, Vircan Ana, Ramona Ciobanu, e demais que me acompanharam durante esta fantástica viagem.

Ao meu amigo, Doutor José de Anchieta e família.

Agradeço aos Professores Doutores Edna Maria, e Rubens Maribondo, os quais não mediram esforços em fazer com que este trabalho fosse realizado.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e em especial ao Departamento de Engenharia Têxtil, o qual deu total apoio para a realização deste trabalho de doutoramento, que desejo retribuir, contribuindo para o seu crescimento.

À Capes, pelo financiamento deste doutoramento, através do Processo nº BEX 0547/09-3, o qual foi imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais colegas e amigos, pela prestimosa colaboração, amizade e espírito de entreatajuda.

Em especial à **Minha Família**: a base de tudo.

Por último, mas que com certeza muitíssimo importante, à Nilde (*my love*), Renato e Gustavo, meus pilares familiares que me deram apoio, acompanharam, incentivaram e conviveram sempre ao meu lado durante esta vivência em Portugal.

Resumo

O presente trabalho objetiva alargar as fronteiras do conhecimento acerca do comportamento de estruturas fibrosas utilizando materiais com memória de forma e elastômeros, na produção de estruturas dinâmicas, capazes de responder a situações específicas de variação de temperatura, assumindo determinadas geometrias, de acordo com as necessidades da aplicação.

Foi estudada a aplicação de fios com base em ligas com memória de forma, nomeadamente a liga Níquel-Titânio - NiTi, deformadas na forma de laçadas normal, carregada e flutuante, na produção malhas de trama com comportamento dinâmico, em função da temperatura do ambiente exterior. Os fios de memória de forma foram igualmente combinados com fios elastoméricos a fim de se entender a influência do comportamento inverso dos dois materiais no desempenho de estruturas de malha.

Inicialmente foram estudadas as propriedades dos fios de NiTi no que tange à sua tricotabilidade. Os resultados obtidos demonstram que os fios de NiTi possuem coeficiente de atrito compatível com o processo de tricotagem, tanto em superfícies de aço inox, bem como em cerâmica, correspondente aos guia-fios e demais superfícies das máquinas de malharia em que os fios têm contato. Por outro lado, os valores correspondentes ao comportamento em flexão e à tração, indicaram dificuldades no processamento por parte das máquinas de tricotagem, essencialmente quando se trata de estruturas muito densas e de reduzido comprimento de laçada. Este facto verificou-se pela baixa elasticidade e elevada rigidez à flexão dos fios ensaiados.

Resultados acerca da energia disponível para realização de trabalho de movimentação da estrutura fibrosa, para fios de NiTi, com diferentes diâmetros e forma de laçada, mostraram que a energia disponível depende diretamente do diâmetro e da forma que se encontra deformado, evidenciado pelos fios de 210 μm de diâmetro em forma de laçadas carregadas, que apresentaram dispor de maior energia disponível. Por outro lado, o fio de 127 μm apresentou considerável energia disponível para realização de trabalho para as diferentes estruturas

estudadas, bem como melhores propriedades de tricotabilidade, quando em comparação com os demais estudados.

Resultados a cerca da combinação de fios de NiTi de 127 μm com elastômeros, indicou que mais que 1 fio de elastômero com densidade linear acima de 185 dtex apresenta elevada resistência mecânica para ser movimentado por apenas 1 fio de NiTi.

Resultados dos estudos acerca da utilização de fios de NiTi em estruturas de malha de trama, mostraram que à medida que se aumentou a densidade de fileiras de NiTi na estrutura, houve uma inversão nas propriedades de elasticidade das malhas, fazendo com que aumentasse a elasticidade no sentido das colunas, e reduzisse no sentido das fileiras.

Os estudos conduzidos acerca da combinação de fios com memória de forma e elastômeros em estruturas tubulares sobre as propriedades de compressão, mostraram que em os fios de NiTi utilizados nas estruturas não possuíam energia suficiente para mover a estrutura base, evidenciado por pequenas variações percentuais na compressão das estruturas quando postos em presença de calor a 85° C.

Finalmente, a realização deste trabalho conduz a um conjunto de pesquisas futuras no sentido de alargar as fronteiras do conhecimento neste campo do domínio, às quais se enumera estudar a utilização de polímeros com memória de forma e elastômeros na produção de estruturas tridimensionais dinâmicas; melhorar as propriedades de tricotabilidade dos fios metálicos através do recobrimento dos fios; e estudar o desenvolvimento de estruturas auxéticas com efeitos de memória de forma.

Abstract

The present research aims to extend the knowledge borders about the behaviour of fibrous structures using shape memory materials and elastomers in the production of dynamic structures able of responding to specific situations of temperature changes, assuming certain geometries, according to application needs.

Were studied the application of shape memory alloy wires, especially the Nickel-Titanium alloy - NiTi, deformed in stitch, tuck and miss loop types, in the production of dynamic weft knitting structures, as a function of the temperature. The shape memory wires have also been combined with elastomeric yarns in order to understand the influence of the opposite behaviour for both materials on the performance of the knitted structures.

Initially were studied the NiTi wires properties for knitting process. The obtained results for friction on stainless steel and ceramic surfaces, corresponding to yarn guide surfaces and other knitting machines parts in which the wires are in contact, show that the NiTi wires have compatible coefficient of friction for the knitting process. On the other hand, the values corresponding to the behaviours in bending and tension, suggest difficulties in processing NiTi wires by the knitting machines, particularly in production of dense structures and reduced length loops. This was verified by the low elasticity and high bending stiffness of the wires tested.

Results obtained for three different types of NiTi wires showed that the available energy to move the fibrous structure is directly dependent of the diameter and shape in which the wire is deformed. This was evidenced by the wire with 210 μm diameter deformed as a tuck loop, which showed to have higher available energy. On the other hand, for the different wires studied, the 127 μm NiTi wire showed to have considerable energy able to work, as well as best knitting properties when compared with other studied.

Results for the combination of NiTi wires with elastomers indicated that more than one elastomeric yarn in with linear density over 185 dtex has high mechanical strength to be moved by only one 127 μm NiTi wire.

Results of studies about the use of NiTi wires in weft knitted structures, showed that increasing the density of NiTi rows in the structure, leads to a reversal in the elastic properties of the knit structures, increasing elasticity in the direction of the columns, and reducing in the direction of the rows.

Studies on the combination of shape memory alloy wires and elastomers yarns in tubular structures over compression properties showed that the NiTi wires used in the structures had not enough energy to move the base structure, as evidenced by small variations in the compression percentage of the structures when placed in the presence of heat to 85° C.

Finally, this work leads to a set of future researches which leads to expand the knowledge frontiers in this field domain. It leads to be investigated the use of shape memory polymers and elastomers in the production of dynamic three-dimensional structures; as well as improve knitting properties of the wires through recoating the wire; and finally, study the development of auxetic structures with shape memory effects.

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Índice de Figuras	xv
Índice de Quadros	xix
Abreviações	xxi
CAPÍTULO I - Introdução	1
1.1. Enquadramento e justificação do trabalho	3
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Metodologia adotada.....	6
1.3.1. Pesquisa bibliográfica	6
1.3.2. Definição e execução do plano de trabalho	7
1.4. Estrutura da tese	8
CAPÍTULO II - Estado da arte	9
2.1. Têxteis Técnicos.....	11
2.1.1. Estruturas têxteis	13
2.1.1.1. Tecidos.....	13
2.1.1.2. Malhas	13
2.1.1.3. Estruturas tridimensionais (3D)	14
2.1.1.4. Materiais e estruturas auxéticas	19
2.2. Materiais com memória de forma.....	20
2.2.1. Propriedades das ligas metálicas com memória de forma – SMA.....	26
2.2.1.1. Efeitos de memória de forma simples e duplo	27
2.2.1.2. Fases de transformação.....	27
2.2.1.3. Curva de histerese dos materiais com memória de forma.....	29
2.2.1.4. Pseudo-elasticidade dos materiais com memória de forma	30
2.2.1.5. Efeito amortecedor.....	31

2.2.2.	Liga Níquel-Titânio (NiTi)	32
2.2.2.1.	Aplicações da liga NiTi	33
2.2.2.2.	Aplicações do NiTi na área têxtil	33
2.3.	Polímeros com memória de forma	39
2.3.1.	Novos materiais e comportamento dos polímeros com memória de forma	41
2.3.2.	Aplicações dos polímeros com memória de forma	41
2.3.2.1.	Aplicações dos polímeros com memória de forma na área têxtil.....	42
2.4.	Conclusões	45
CAPÍTULO III - Estudo da tricotabilidade de fios de NiTi		47
3.1.	Introdução	49
3.2.	Características do fio Níquel-Titânio - NiTi	50
3.3.	Propriedades de atrito.....	51
3.3.1.	Método de ensaio para determinação do coeficiente de atrito dos fios de NiTi	52
3.3.1.1.	Desenvolvimento do equipamento	53
3.3.1.2.	Ensaio e resultados	54
3.3.2.	Análise de resultados	56
3.4.	Propriedades de Flexão.....	57
3.4.1.	Método de ensaio para determinação das propriedades de flexão dos fios de NiTi.....	57
3.4.2.	Análise dos resultados	59
3.5.	Propriedades de Tração	60
3.5.1.	Método de ensaio para determinação das propriedades de tração dos fios de NiTi	61
3.5.2.	Análise de resultados	62
3.6.	Conclusões	63
CAPÍTULO IV - Análise da absorção de energia de fios de NiTi		65
4.1.	Introdução	67
4.2.	Materiais e métodos.....	67
4.2.1.	Materiais	67
4.2.2.	Método experimental.....	70
4.3.	Análise dos resultados	71
4.3.1.	Influência do diâmetro dos fios.....	71
4.3.2.	Influência do tipo de laçada.....	74
4.3.3.	Energia	75

4.4.	Conclusões	78
CAPÍTULO V - Análise do comportamento de fios com memória de forma e elastômeros.....		81
5.1.	Introdução	83
5.2.	Planeamento das experiências	83
5.2.1.	Preparação das amostras.....	86
5.3.	Ensaio de tração	87
5.4.	Análise dos resultados	88
5.4.1.	Comportamento mecânico dos fios de NiTi e elastano	88
5.4.2.	Comportamento mecânico dos ensaios de tração dos conjuntos NiTi-Elastano	90
5.4.3.	Influência da temperatura	92
5.4.4.	Influência do tipo de laçada.....	93
5.4.5.	Influência da massa linear dos elastanos.....	97
5.4.6.	Influência do número de fios de elastano.....	98
5.5.	Conclusões.....	101
CAPÍTULO VI - Análise do comportamento de malhas de trama com fios com memória de forma... ..		103
6.1.	Introdução	105
6.2.	Planeamento das experiências	105
6.2.1.	Produção das amostras	109
6.2.2.	Corte e preparação das amostras.....	110
6.2.3.	Ensaio e avaliação das propriedades de tração	111
6.2.4.	Discussão dos resultados.....	113
6.2.4.1.	Comportamento mecânico das malhas com fios de NiTi.....	113
6.2.4.2.	Influência da densidade dos fios de NiTi/fibra acrílica.....	114
6.2.4.3.	Influência da forma da laçada	115
6.2.4.4.	Influência da temperatura nos ensaios de tração.....	117
6.2.5.	Conclusões.....	121
CAPÍTULO VII - Estudo da influência dos materiais com memória de forma e elastômeros em estruturas de malhas tubulares.....		123
7.1.	Introdução	125
7.2.	Planeamento de experiências.....	126
7.3.	Produção das amostras	127

7.4.	Caracterização das malhas tubulares	129
7.5.	Ensaio de compressão das malhas tubulares com forma	129
7.6.	Resultados e discussões	131
7.6.1.	Capacidade de compressão das malhas tubulares.....	131
7.6.2.	Efeito da densidade sobre os valores de compressão.....	132
7.6.3.	Efeito da temperatura na capacidade de compressão	134
7.7.	Conclusões.....	135
CAPÍTULO VIII - Conclusões		137
8.1.	Considerações finais.....	139
8.2.	Perspectivas futuras.....	142
Bibliografia		143

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplos de aplicações de têxteis técnicos nas diversas áreas [4, 9, 22]	12
Figura 2 - Estruturas têxteis 3D: multicamada (a), sanduiche (b) e com formas (c) [31-33]	14
Figura 3 - Tecido auxético em repouso (a) e tensionado (b) (adaptado de [38])	19
Figura 4 - Processamento de seda com memória de forma (adaptado de [52])	22
Figura 5 - Absorção de calor e isolamento solar α (adaptado de [52])	23
Figura 6 - Exemplo esquemático de um polímero com memória de forma em solução, sob uma superfície e como hidrogel (adaptado de [53])	24
Figura 7 - Esquema ilustrativo a cerca da fase de transição e da estrutura cristalina de uma liga metálica com memória de forma (adaptado de [63])	28
Figura 8 – Curva de histerese (adaptado de [64])	29
Figura 9 - Ilustração do efeito de pseudo-elasticidade de um clips com memória de forma (adaptado de [68])	30
Figura 10 – Efeito amortecedor (adaptado de [69])	31
Figura 11 - Tecido SMA de NiTi GEMTEX (adaptado de [69])	34
Figura 12 - Esquematização da mola de SMA entre duas camadas de tecido [87]	35
Figura 13 - Recuperação do vinco após o período de tempo: a) $t = 0$ s, b) $t = 8$ s, c) $t = 23$ s (adaptado de [90])	37
Figura 14 – Efeito tridimensional numa estrutura de malha (adaptado de [91])	37
Figura 15 – (a) Calça auto ajustável (adaptada de [93]) e (b) camisa inteligente da Corpo Nove [94]	38
Figura 16 – Ciclo termomecânico de um SMP (Adaptado [96])	40
Figura 17 – Mecanismo molecular do SME induzido termicamente. T_{trans} = temperatura de transição termal para a mudança de fase (Adaptado [96])	40
Figura 18 – Estrutura de SMP biodegradável numa experiência em animal mostra a contração do fio enquanto aumenta a temperatura (adaptado de [119])	42
Figura 19 – Membrana adaptativa Diaplex® (adaptado de [120])	43
Figura 20 – Ilustração do Dermizax® (adaptado de [120])	43

Figura 21 – Estruturas de SMP utilizadas como divisórias (a); e como cortinas (b e c) (adaptado de [54])	44
Figura 22 - Histerese do fio SmartFlex (Adaptado de [127])	51
Figura 23 – Esquema de ensaio de atrito utilizando o dinamómetro (adaptado de [131])	53
Figura 24 – Dispositivo desenvolvido para realização de teste de atrito em fios	53
Figura 25 - Dispositivos com superfícies em cerâmica e inox para medição do coeficiente de atrito	54
Figura 26 – Ensaio de atrito utilizando equipamento de ensaio de tração	54
Figura 27 - Coeficiente de atrito para fios de NiTi 127 μ m	56
Figura 28 – Amostras a serem ensaiadas contendo fios de NiTi e de PAC	58
Figura 29 - Equipamento KES-3 Bending e curvas de histerese para PAC e NiTi	58
Figura 30 - Curvas carga-extensão para os fios de NiTi e PAC	61
Figura 31 - Estruturas de malha mostrando laçada normal (a), laçada carregada (b) e laçada flutuante (c)	69
Figura 32 - Laçadas produzidas com fios de NiTi	69
Figura 33 - dinamómetro H100KS “ <i>Hounsfield Universal Testing Instrument</i> ”, equipado com câmara térmica com controlo da temperatura	70
Figura 34 - Método de teste: posição inicial (1), deformação média (2) e linearidade do fio (3). ..	71
Figura 35 - Curva típica de tensão/deformação obtida para fios de NiTi na forma de laçada	72
Figura 36 - Curva tensão/deformação dos fios de NiTi	72
Figura 37 - Curva tensão/deformação para fios de NiTi em diferentes tipos de laçadas e diâmetros: 50 μ m (a); 210 μ m (b); 127 μ m (c)	74
Figura 38 - Energia de deformação do fio de NiTi de 210 μ m sobre diferentes tipos de laçadas ..	76
Figura 39 – Correlação entre a energia dos fios de NiTi e os tipos de laçadas e diâmetros	77
Figura 40 - Amostras contendo fios de NiTi deformado em laçadas normais em combinação com fios de elastano	86
Figura 41 - Amostras contendo fios de NiTi deformado em laçadas carregadas em combinação com fios de elastano	86
Figura 42 - Amostras contendo fios de NiTi deformado em laçadas flutuantes em combinação com fios de elastano	86
Figura 43 – Curvas carga-extensão para fios de NiTi sob a forma de laçada em diferentes temperaturas	89

Figura 44 – Curva carga-extensão para fios de elastano	89
Figura 45 – Curva carga-extensão para fios de NiTi sob a forma de laçadas carregada e fios de elastano 285 dtex em diferentes temperaturas.....	92
Figura 46 – Influência da temperatura sobre o comportamento mecânico das amostras em diferentes tipos de laçadas.....	93
Figura 47 - Ensaio de tração da combinação dos fios de NiTi em laçadas normal com fios de elastano	93
Figura 48 - Ensaio de tração da combinação dos fios de NiTi na forma de laçadas carregada com fios de elastano	95
Figura 49 - Ensaio de tração da combinação dos fios de NiTi em laçadas flutuante com fios de elastano	96
Figura 50 – Correlação entre a massa linear (dtex) dos elastanos e a forma de laçada do NiTi sobre a força (a) e extensão (b).....	98
Figura 51 – Influência do número de fios de elastano 285 dtex sobre as diferentes formas de laçada em ensaios de tração.....	98
Figura 52 – Influência do número de fios de elastano 420 dtex sobre as diferentes formas de laçada em ensaios de tração.....	99
Figura 53 – Influência do número de fios de elastano 620 dtex sobre as diferentes formas de laçada em ensaios de tração.....	99
Figura 54 - Tear retilíneo eletrônico Stoll CMS 320 TC.....	109
Figura 55 - Amostra de malha de fios acrílico/NiTi em laçada carregada	110
Figura 56 - Tipos de provetes utilizados nos ensaios de tração.....	111
Figura 57 - Ensaio de tração das malhas, no sentido das fileiras (a) e no sentido das colunas (b)	112
Figura 58 - Áreas de deformações de um provete de malha de trama na curva tensão-deformação [9].....	113
Figura 59 - Comportamento mecânico para malhas de fibra acrílica em diferentes densidades de NiTi	114
Figura 60 - Comportamento mecânico para malhas de fibra acrílica em diferentes densidades de NiTi	114
Figura 61 - Comportamento mecânico quanto à extensão para as diferentes formas de laçadas	116

Figura 62 - Comportamento mecânico quanto à força para as diferentes formas de laçadas ..	116
Figura 63 - Influência da temperatura sobre a extensão para os diferentes tipos de laçadas no sentido das colunas e das fileiras.....	117
Figura 64 - Correlação linear do comportamento das malhas de trama sobre a temperatura quanto à extensão no sentido das colunas e das fileiras	118
Figura 65 - Influência da temperatura sobre a extensão para os diferentes tipos de laçadas no sentido das colunas e das fileiras.....	119
Figura 66 – Correlação linear do comportamento das malhas de trama sobre a temperatura quanto à força no sentido das colunas e das fileiras.....	120
Figura 67 - Tricotagem em tear laboratorial “TricoLab”	127
Figura 68 - Tricotagem em tear retilíneo manual	128
Figura 69 - Amostras produzidas no tear retilíneo com diferentes densidades de NiTi com acrílico e elastano.....	128
Figura 70 - Aparelho para ensaio de compressão em meias. Equipamento STM579 (a); indicador de tensão (b)	129
Figura 71 - Ensaio de compressão utilizando o <i>Stocking Compression Tester – STM 579</i>	130
Figura 72 - Efeitos da densidade sobre a compressão em malha tubulares.....	133
Figura 73 - Curvas de correlação entre a densidade das malhas tubulares e valores de compressão.....	133

Índice de Quadros

Quadro 1 - Características do fio SmartFlex®	50
Quadro 2 - Comparação entre os valores de atrito obtidos por diferentes métodos	55
Quadro 3 - Resultados dos ensaios de flexão sobre amostras com 5 fios cada em curvatura de 1 cm	59
Quadro 4 – Propriedades mecânicas dos fios estudados	61
Quadro 5 - Propriedades dos fios de NiTi.....	67
Quadro 6 - Parâmetros estruturais das amostras.....	68
Quadro 7 – Ponto de bloqueio para diferentes tipos de laçadas e diâmetros	73
Quadro 8 - Energia disponível dos fios de NiTi	76
Quadro 9 - Tipologia das amostras contendo apenas fios de NiTi como base	84
Quadro 10 - Combinação das amostras contendo fios de NiTi e elastano para testes a 21 e a 85° C.....	85
Quadro 11 – Resultados obtidos no ponto de deformação estrutural máximo para fios unitários de elastano e de NiTi sob diferentes tipos de laçadas e temperaturas.....	88
Quadro 12 – Pontos de bloqueio para as amostras contendo fios de NiTi deformados em forma de laçada normal em conjunto com fios de elastano	90
Quadro 13 - Pontos de bloqueio para as amostras contendo fios de NiTi deformados em forma de laçada carregada em conjunto com fios de elastano.....	91
Quadro 14 - Pontos de bloqueio para as amostras contendo fios de NiTi deformados em forma de laçada flutuante em conjunto com fios de elastano.....	91
Quadro 15 - Fatores utilizados para planificação das experiências dos ensaios de tração	106
Quadro 16 - Planificação das amostras de malhas de trama.....	107
Quadro 17 – Propriedades das amostras de malhas de trama produzidas.....	110
Quadro 18 - Comparação da compressão requerida no tornozelo para as diferentes normas (adaptado de [144]).....	125
Quadro 19 - Fatores utilizados para planificação das experiências em malhas tubulares	126
Quadro 20 – Caracterização das malhas tubulares.....	129
Quadro 21 – Valores de compressão para as estruturas de malha tubular.....	131

Abreviações

% - Percentagem	MPT – Fase de transformação Martensítica
° C – Graus centígrados	M _s – Martensite inicial
μm – Micrômetro	N – Newton
μs – Coeficiente de atrito	NiTi – Níquel-Titânio
3D – Tridimensional	nm – Nanômetro
A – Austenite	NOL – Naval Ordnance Laboratory
A+M – Zona de transição entre Austenite e Martensite	PA – Poliamida
Ac - Acrílico	PCM – Mudança de fase dos materiais
A _f – Austenite final	PE – Polietileno
AFM – Microscopia de força atômica	PES – Poliéster
A _s – Austenite inicial	PU - Poliuretano
cm – Centímetro	SMA – Ligas com memória de forma
cN – Centi Newton	SME – Efeito de memória de forma
CuAlNi – Liga cobre-alumínio-níquel	SMM – Materiais com memória de forma
CuZnAl – Liga cobre-zinco-alumínio	SMP – Polímeros com memória de forma
CV - Coeficiente de variação	SMPU – Poliuretano com memória de forma
DSC - Análise calorimétrica diferencial	SOC – Capacidade de amortecimento ao choque
d tex – Decitex	TWSME – Duplo efeito de memória de forma
Ea - Elastano	U - Energia
Eq. – Equação	π – Pi (3,1415)
Fig. - Figura	
KPa - Kilo Pascais	
M - Martensite	
M _f – Martensite final	
MHI – Mitsubishi Heavy Industries	
mm – Milímetro	
mmHg - Milímetro de Mercúrio	
Mpa – Mega Pascais	

CAPÍTULO I - Introdução

1.1. Enquadramento e justificação do trabalho

A utilização de materiais à base de fibras remete à criação da humanidade. A necessidade do uso pelo homem de vestuário para se proteger das condições do meio ambiente, surgiu provavelmente com os movimentos migratórios do Homo Sapiens, das regiões quentes da África para as temperadas e frias da Europa, que estima terem ocorrido há 50.000 ou 60.000 anos [1].

Segundo Sanches [2], o que começou por ser apenas uma necessidade, transformou-se num meio para definir a classe social, o clã, a etnia, o povo a que se pertencia. Posteriormente, além do objetivo inicial do tecido (o de vestir), uniu-se a necessidade de utilizá-lo para marcar a diferença entre os homens. Isto deu origem aos intercâmbios de tecelões do mundo inteiro. A arte têxtil depressa se transformou num poder imenso que incentivava os artesãos cada vez mais a aperfeiçoarem nos seus ofícios.

De acordo com Dias [3], os materiais fibrosos, designados por têxteis técnicos, passaram a ser utilizados em situações onde o desempenho assume uma importância primordial e a estética um papel mais limitado. A gama de aplicações dos materiais fibrosos tem-se alargado de forma crescente nos últimos anos. Sob a forma de fibras, fios ou tecidos, tem conhecido desenvolvimentos acentuados. Efetivamente, através dos diferentes processos têxteis, é possível combinar diferentes características num só produto, tais como flexibilidade ou rigidez, baixo peso e resistência. É ainda possível projetar e desenvolver estruturas têxteis extremamente resistentes com excelente caimento e flexibilidade, podendo, em algumas delas, a resistência ser mais elevada do que a do aço ou de outro tipo de material comumente utilizado [4].

A necessidade de aplicação dos materiais fibrosos em situações cada vez mais específicas, com requisitos técnicos cada vez mais exigentes, tem originado o desenvolvimento de novas fibras e novos acabamentos que respondam de forma eficiente às solicitações impostas por cada aplicação em particular. A forma como as fibras se dispõem no material, assume, nestes casos, papel fundamental no desempenho da estrutura. A este nível as estruturas mais usadas são, na sua grande maioria, tecidos, malhas, não tecidos e entrançados. O desenvolvimento de estruturas fibrosas híbridas, combinando duas ou mais estruturas têxteis a partir de uma tecnologia de produção têxtil, tem sido pouco explorado ao longo dos últimos anos. As estruturas

híbridas representam uma nova forma de resposta às exigências de aplicações cada vez mais específicas, onde uma estrutura só, não apresenta as características e/ou propriedades necessárias para satisfazer os requisitos de desempenho impostos.

O desenvolvimento de estruturas fibrosas a partir das diferentes tecnologias têxteis disponíveis tem conhecido nos últimos tempos, desenvolvimentos extremamente interessantes, quer sob o ponto de vista científico, quer sob o ponto de vista tecnológico e industrial. Com particular interesse em aplicações técnicas, nomeadamente no reforço de matrizes poliméricas, estes tipos de estruturas têm também encontrado aplicações muito interessantes em situações onde a estética assume importância particular, como na área do design, no vestuário e nos têxteis-lar comuns, os quais estas estruturas apresentam como principais vantagens, a eliminação de desperdícios, a distribuição homogênea das propriedades e a eliminação de operações subsequentes de corte e costura.

A investigação neste domínio tem-se centrado fundamentalmente na adaptação das tecnologias, ou no desenvolvimento de técnicas que possibilitem a produção destas estruturas, utilizando as tecnologias de malhas, tecidos, não tecidos ou entrançados. No que diz respeito à tecnologia da tecelagem, importantes avanços neste domínio foram proporcionados pelos trabalhos de Mohamed [5], Kohkar [6] e Busgen [7], com o objetivo de produção de tecidos 3D compactos, nos dois primeiros casos, e de tecidos 3D com forma, no último. Entretanto, as tecnologias desenvolvidas têm sido aplicadas no desenvolvimento de estruturas estáticas, ou seja, estruturas que adquirem uma determinada forma durante o processo produtivo e a mantêm durante o seu ciclo de vida, independentemente dos estímulos a que são sujeitas. Estes tipos de estruturas satisfazem aos requisitos impostos, principalmente pela indústria dos materiais compósitos, onde uma vez impregnadas com a matriz, assumem a sua forma final. No entanto, em determinadas aplicações, torna-se necessário que a estrutura varie a sua geometria, de maneira a responder às solicitações impostas a cada momento. Assim sendo, é necessário utilizar materiais que permitam esta variação, a partir da aplicação de estímulos exteriores, que obriguem a estrutura a adotar uma determinada geometria e que, após uma nova variação do estímulo, possa regressar à sua geometria inicial [8]. A obtenção deste comportamento de forma controlada obriga a estudos aprofundados sobre o comportamento dos materiais no interior da estrutura, bem como, sobre a influência da variação das propriedades estruturais dos tecidos e do seu comportamento.

Após uma profunda análise bibliográfica acerca da utilização de materiais com memória de forma em estruturas têxteis, concluiu-se que os estudos científicos publicados sobre esta temática são bastante escassos. A utilização deste tipo de estruturas tem-se desenvolvido principalmente quase que na sua totalidade direcionados à área do design, onde o cunho científico do conhecimento acerca das propriedades estruturais destes materiais não tem logrado expressivo êxito. Neste contexto, este trabalho de doutoramento pretende igualmente contribuir para alargar as fronteiras do conhecimento acerca do comportamento das estruturas fibrosas utilizando materiais com memória de forma e elastómeros.

1.2.Objetivos

Este trabalho de investigação objetiva contribuir para alargar as fronteiras do conhecimento acerca do comportamento de estruturas fibrosas utilizando materiais com memória de forma e elastómeros. Para alcançar o objetivo principal, diversas atividades serão levadas a cabo a fim de permitir estudar o comportamento destes materiais em estruturas fibrosas. Assim, definem-se os seguintes objetivos específicos.

- Estudar a tricotabilidade de fios de NiTi;
- Estudar o comportamento dos materiais com memória de forma sob diferentes tipos de laçadas;
- Estudar o comportamento das estruturas fibrosas incorporando materiais com memória de forma, incluindo a influência dos parâmetros estruturais de cada uma das estruturas;
- Estudar a influência da combinação de fios com memória de forma com fios elastoméricos no comportamento das estruturas têxteis;
- Estudar o comportamento das estruturas de malhas tubulares utilizando materiais com memória de forma e elastómeros.

1.3.Metodologia adotada

A metodologia adotada para a elaboração do presente trabalho consistiu numa sequência de fases abaixo descritas:

1.3.1. Pesquisa bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica a fim de analisar criticamente o estado da arte no tocante ao que já foi estudado e publicado acerca de estruturas têxteis utilizando materiais com memória de forma. Esta pesquisa baseou-se principalmente em artigos científicos, livros, revistas especializadas, patentes, atas de conferência e demais sítios relacionados, a qual deu suporte para que fosse possível conhecer as fronteiras do conhecimento acerca deste tema e definir-se o plano de trabalho para o presente estudo.

1.3.2. Definição e execução do plano de trabalho

O plano de trabalho foi definido levando em consideração as seguintes etapas:

- Identificação dos materiais com memória de forma existente no mercado, suas propriedades e características;
- Estudo da tricotabilidade de fios de Níquel-Titânio - NiTi;
- Estudo da absorção de energia dos fios de NiTi sob diferentes tipos de laçadas e diâmetros;
- Avaliação da combinação de fios com memória de forma e elastômeros em diferentes tipos de laçadas;
- Estudo do comportamento dos fios com memória de forma em tecidos de malha variando o tipo de laçada e a sua densidade;
- Estudo da influência dos materiais com memória de forma e elastômeros em estruturas tubulares;
- Redação da tese.

1.4. Estrutura da tese

A tese foi estruturada de forma a facilitar a sua leitura e está dividida em oito capítulos. Neste primeiro capítulo é feita uma introdução com apresentação do enquadramento e justificação do trabalho, objetivos, metodologia utilizada e estrutura da tese.

O Capítulo II é dedicado ao estado da arte acerca dos materiais com memória de forma aplicados aos têxteis, o qual foi escrito sob uma análise crítica relativamente aos trabalhos de investigação já publicados neste domínio.

O Capítulo III descreve o estudo das propriedades dos fios de NiTi, nomeadamente quanto ao atrito sob superfícies de aço inox e cerâmica, ensaios à flexão e à tração, os quais estão diretamente relacionadas com a tricotabilidade dos materiais.

O Capítulo IV apresenta o trabalho realizado objetivando analisar a absorção de energia dos fios de NiTi, variando o diâmetro e o tipo de laçada.

O Capítulo V descreve o estudo realizado a fim de avaliar o comportamento de fios com memória de forma em combinação com fios elastoméricos sobre diferentes tipos de laçadas.

O Capítulo VI apresenta resultados sobre a avaliação do comportamento dos fios com memória de forma em tecidos de malha, variando o tipo de laçada e a densidade de fios de NiTi na estrutura.

O Capítulo VII é dedicado ao estudo da influencia dos materiais com memória de forma e elastómeros em estruturas tubulares.

Finalmente, o Capítulo VIII apresenta as conclusões obtidas para o presente trabalho de doutoramento e aponta perspectivas futuras neste domínio.

CAPÍTULO II - Estado da arte

2.1. Têxteis Técnicos

Segundo Araújo et al. [9, 10], os têxteis técnicos são produtos manufaturados flexíveis, compostos por estruturas, redes ou aglomerados de fibras têxteis onde a funcionalidade é o fator predominante. Outra interpretação para os têxteis técnicos foi dada por Adanur [11] e Ciobanu [12] os quais definem que são estruturas especificamente projetadas e desenvolvidas para utilização em produtos, processos ou serviços de quase todas as áreas industriais. De acordo com Figueiro [4], partindo desta definição, um têxtil técnico pode ser utilizado de três formas diferentes:

1. como componente de outro produto contribuindo diretamente para a sua resistência, desempenho e outras propriedades (ex.: materiais compósitos reforçados por têxteis);
2. como ferramenta na produção de outro produto (ex.: filtros têxteis na indústria alimentar);
3. isoladamente, desempenhando uma ou várias funções específicas (ex.: geotêxteis).

As diferenças existentes entre os têxteis técnicos e os têxteis convencionais, aplicados em vestuário comum e em têxteis-lar, no que respeita às exigências de desempenho, aos materiais e processos de produção utilizados, aos métodos de ensaio, à durabilidade e ao custo são apresentados por Araújo et al. [10]. Outras aplicações foram apresentadas e discutidas por Adanur et al. [11].

Na construção civil, os geotêxteis encontram uma vasta gama de aplicações, desempenhando funções de separação, reforço, filtração, drenagem e proteção [13]. Enquanto que na arquitetura, os materiais têxteis são aplicados na cobertura e na construção de edifícios de grandes dimensões como estádios, aeroportos, pavilhões desportivos, centros de exposições, etc.

Segundo Figueiro [4], estes tipos de materiais apresentam considerável resistência à luz solar, à temperatura, ao ataque biológico, ao vento, à chuva e à neve. A maior vantagem da utilização destes materiais na construção é o seu baixo peso que proporciona o aumento do vão entre os suportes, facilitando a construção.

Na medicina, para além do vestuário de proteção médico, os materiais têxteis, em fibra ou tecidos, são utilizados em implantes, próteses, filtros, vasos sanguíneos e intervenções cirúrgicas, dentre outras [14-16].

Os materiais têxteis são também largamente utilizados em veículos e sistemas de transporte incluindo automóveis, comboios, autocarros, aviões e veículos marinhos. Os materiais têxteis são também utilizados na proteção contra os efeitos de ambientes perigosos que possam provocar danos pessoais ou mesmo a morte. Esta proteção inclui, proteção mecânica (corte, penetração e impacto), proteção balística, proteção térmica (calor, frio, chama, intempéries), proteção química (líquidos, gases e pó), proteção eléctrica (acumulação de cargas eletrostáticas), proteção contra radiações e proteção contra contaminações por micro-organismos [10, 17, 18].

Os materiais têxteis utilizados em artigos militares e de defesa podem ser agrupados em duas categorias: (1) vestuário de proteção e equipamento individual, incluindo uniformes, coletes à prova de bala, capacetes, uniformes para proteção química, cintos, cordas de montanha, etc., e (2) materiais utilizados nos sistemas de defesa e armas, incluindo, tendas, paraquedas, camuflagens e materiais compósitos utilizados na fabricação de mísseis, aviões de combate, etc. [19, 20].

No desporto e lazer, os materiais têxteis encontram inúmeras aplicações [21]. As fibras e os tecidos de elevado desempenho são utilizados em vestuário, equipamentos e instalações desportivas.

A Figura 1 ilustra diversas aplicações dos têxteis técnicos.



Figura 1 - Exemplos de aplicações de têxteis técnicos nas diversas áreas [4, 9, 22]

2.1.1. Estruturas têxteis

De um modo geral, as estruturas têxteis convencionais são produzidas por técnicas de tecelagem, tricotagem, entrançamento ou não-tecidos ou pela combinação de mais de uma destas e são utilizadas maioritariamente nos produtos têxteis tradicionais, como o vestuário e os têxteis-lar, ou em acessórios para a produção destes [23-26]. Atualmente, estas estruturas são igualmente utilizadas em aplicações técnicas diferentes do vestuário ou dos têxteis-lar. Nos têxteis técnicos, os processos envolvidos na produção de estruturas têxteis são apenas utilizados com o propósito de formar a arquitetura da estrutura, orientando as fibras em determinadas direções, de acordo com as especificações da aplicação em vista.

Cada um destes processos pode produzir um variado leque de combinações que conferirão propriedades mecânicas específicas de acordo com a aplicação em vista.

2.1.1.1. Tecidos

De acordo com Fangueiro [4], os tecidos são produzidos pelo cruzamento ortogonal a 90° de dois ou mais sistemas de fios e exibem boa estabilidade na direção da trama (0°) e da teia (90°), oferecendo a maior cobertura ou densidade de empacotamento dos fios em relação à espessura (dois diâmetros dos fios para estruturas simples). Os tecidos estão disponíveis em larguras estreitas e largas, em formas tubulares e planas e numa vasta gama de combinações teia/trama com ou sem a introdução de fios de reforço.

2.1.1.2. Malhas

Na produção de malhas, o entrelaçamento dos fios dá-se pela formação de laçadas. De um modo geral, as malhas oferecem uma gama maior de combinações quanto às formas e consequentemente comportamentos mecânicos e físicos quando comparados aos tecidos. As malhas planas podem ser produzidas por duas técnicas têxteis fundamentais: teia e trama.

2.1.1.3. Estruturas tridimensionais (3D)

Segundo Araújo et al. [10, 17, 18], a aplicação em grande escala das estruturas tridimensionais teve início no final da década de 1960 como objetivo de atender às necessidades da então emergente indústria aeroespacial, que necessitava produzir materiais capazes de suportar aos desgastes mecânicos multidirecionais principalmente sob condições térmicas extremas. Desde então, tem sido desenvolvido cada vez mais um elevado número de estruturas têxteis 3D capazes de responder às condições mais exigentes de cada utilização. Estes tipos de materiais são confeccionados utilizando os mais diversos tipos de estruturas tais como tecidos, malhas, não-tecidos e entrançados possuindo características diferentes das estruturas convencionais.

Desde então, o aumento no interesse pelo desenvolvimento de estruturas 3D, principalmente para materiais compósitos nas mais variadas áreas como os automóveis, implantes cirúrgicos, peças de aviões e naves espaciais é o resultado direto da tendência de desenvolvimento destes materiais e suas infinitas capacidades de aplicações [10].

As estruturas tridimensionais podem ser divididas em três categorias distintas: estrutura multicamada (a), estrutura sanduíche (b) e estrutura com formas (c), conforme mostrados na Figura 2, respectivamente [27-30].

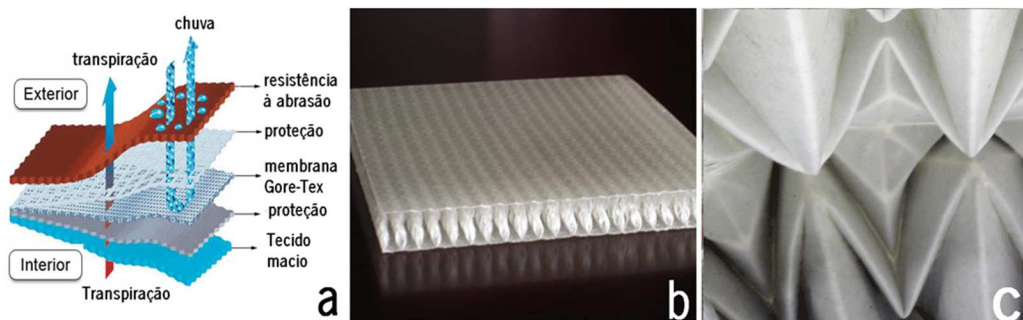


Figura 2 - Estruturas têxteis 3D: multicamada (a), sanduíche (b) e com formas (c) [31-33]

a) Tecidos tridimensionais - 3D

Segundo Unal [34], a produção de tecidos tridimensionais envolve a utilização de teares altamente sofisticados. O *know-how* necessário para a tecelagem de fibras de alto desempenho usadas em aplicações técnicas tem sofrido uma grande evolução nos últimos anos. Estes desenvolvimentos devem levar em conta não só os aspectos ligados aos teares, de natureza mecânica, mas também os problemas relacionados com os materiais utilizados [23].

Os tecidos 3D podem ser divididos em três categorias: tecidos multicamada, tecidos sanduiche e tecidos com formas.

Tecidos multicamada

São considerados tecidos multicamada aqueles que são compostos por vários fios de teia e de trama, formando diferentes camadas. Neste tipo de tecido, as camadas são interligadas através do entrelaçamento dos fios de teia com os fios de trama das camadas adjacentes no tecido, ou por entrelaçamento dos fios constantes entre as camadas da parte superior e da parte inferior da estrutura. De acordo com Fangueiro [4], estes fios de ligação podem também entrelaçar-se verticalmente, formando um tecido ortogonal. As estruturas multicamada podem possuir espessura fina, densa ou até mesmo possuírem espaçamento entre as diferentes camadas componentes.

O tecido multicamada é um tipo de estrutura na qual podem tanto ser utilizadas fibras de alto desempenho como metálicas, cerâmicas, carbono, aramidas, quartzo, dentre outras.

As estruturas multicamada não necessitam de apresentar entrelaçamento entre todas as camadas, para possuírem o mesmo tipo de reforço do que possui uma estrutura tridimensional construído através do entrelaçamento de fios em tecidos bidirecionais, a simples introdução de fios na estrutura em sentido vertical, entrelaçando com as camadas superiores e inferiores, confere ao tecido, as mesmas propriedades de reforço.

Enquanto que as estruturas 3D com estruturas ortogonais contribuem fortemente para a resistência do tecido no sentido da espessura, os fios de ligação aumentam parcialmente a resistência da estrutura multicamada na direção em que são inseridos na estrutura.

Tecidos *spacer* ou sanduiche

Os tecidos classificados como sanduiche ou *spacer*, são produzidos utilizando a mesma técnica de produção de veludos, sendo que no caso dos veludos as duas camadas formadas durante o processo de produção, são separadas, não acontecendo no processo de produção das estruturas sanduiche. Neste caso, a estrutura resultante na qual é formada por duas camadas inferior e superior são interligadas por fios que são entrelaçados perpendicularmente.

O método de produção destas estruturas é muito flexível, permitindo alterações tanto na densidade de fios de ligação, bem como na estrutura e consequentemente na relação entre teia/trama da estrutura. Os fios que determinam a característica tridimensional da estrutura são os que unem as duas camadas superior e inferior, impedindo a delaminação.

Tecidos com forma

Os avanços tecnológicos e científicos têm refletido na área têxtil principalmente por intermédio do desenvolvimento de novas fibras e acabamentos superficiais, nos quais tecidos confeccionados com estes tipos de fibras, possuem capacidades de memorizar uma forma na qual posteriormente deformada, quando em contato com temperatura, luz, ou outro fenómeno físico, retorna à forma previamente memorizada. Através da utilização de fios que possuem propriedades de memória de forma podem-se criar tecidos que apresentam efeitos tridimensionais na sua forma superficial, praticamente dando vida ao tecido [35].

b) Malhas 3D

Para o processo de produção das malhas tridimensionais pode ser utilizados tanto a técnica de formação de malhas de teia, bem como a técnica de produção de malhas de trama. Entretanto, para utilização destes tipos de malhas tridimensionais como reforço de materiais compósitos existem limitações, devido a baixa tenacidade da estrutura, que é atribuída à formação das laçadas. Este problema poderá ser contornado em algumas situações, através da inserção de fios de reforço na estrutura, especialmente nas direções em que a estrutura está a sofrer ação de forças com maior intensidade [12].

A produção de malhas utilizando fios compostos de fibras rígidas, como as metálicas, pode ser bastante problemática devido à flexão exigida durante o processo para a formação das laçadas. Por outro lado, com o advento da nova geração de teares retilíneos eletrônicos para malhas de trama, nos quais demandam uma gama de configurações na máquina que podem ser modificadas, a produção de malhas com forma adquiriu grande importância.

Malhas de teia sanduiche

As malhas de teia sanduiche, são formadas conforme os tecidos sanduiche, constituídos por duas camadas superior e inferior, e ligadas por fios no centro, em sentido perpendicular às camada, constituindo uma estrutura tridimensional, conforme mostrado na Figura 2b.

Malhas de teia com forma

Segundo Torki [36], já em meados de 1980, foi concebido e desenvolvido na Itália por um construtor de capacetes, uma malha com forma para produção de capacetes de choque, na qual objetivou aumentar a resistência ao impacto bem como aumentar o nível de automação do processo. O processo então denominado *Fibernet*, foi concebido a partir da tricotagem de gorros utilizando fibras de aramida às quais foram forçados a tomar a forma de um chapéu.

Malhas de trama sanduiche

No processo de produção de malhas de trama sanduiche, a técnica de tricotagem depende tanto das estruturas de ligação, quanto das direções de ligação dos fios. As estruturas de ligação neste tipo de malha, podem ser inclinadas, perpendiculares, ou podem possuir outro tipo de formação em relação às duas estruturas independentes, podendo ser produzidas sob a forma de *rib*, *jersey*, ou *interlock*.

Uma das principais vantagens das malhas de trama sanduiche é a possibilidade de variação do tipo de ligação entre as camadas exterior e interior, às quais permitem se efetuar ligações através de fios ou por intermédio de estruturas.

Malhas de trama com forma

A produção de estruturas de malha de trama com forma são mais fáceis de serem produzidos utilizando os teares retilíneos, especialmente os eletrónicos, que são largamente utilizados principalmente para a produção de roupas interiores. Este tipo de equipamento é bastante indicado para a produção destas estruturas, especificamente pela possibilidade de permitir a seleção individual de agulhas com a ação do calcador e das platinas de retenção.

Através da combinação de diferentes estruturas durante o processo de tricotagem, é possível a produção de estruturas com formas tridimensionais, além do mais, em situações em que o título dos fios e o comprimento das laçadas são os mesmos, podem produzir diferentes estruturas geométricas [23].

c) Entrançados 3D

Os materiais entrançados tridimensionais dependendo da maneira como os fios componentes da estrutura se encontram entrançados, possuem boa estabilidade dimensional e forma. Este tipo de estrutura pode ser produzida sob diferentes formas, além de permitir a inserção de fios de reforço na estrutura. Por outro lado, são mais limitados, em termos da sua secção transversal, do que os outros tipos de estruturas têxteis, devido à técnica de produção utilizada na qual utiliza uma quantidade limitada de bobinas, que se encontram em constante movimento.

2.1.1.4. Materiais e estruturas auxéticas

Segundo Steffens [37], os materiais e estruturas auxéticas diferenciam-se dos convencionalmente utilizados principalmente por apresentarem como característica principal o coeficiente de Poisson negativo, ou seja, são materiais que quando tensionados aumentam sua seção transversal, enquanto alongam no sentido longitudinal, conforme esquema apresentado na Figura 3, demonstrado por Hu [38]. Uma das grandes principais vantagens desses novos materiais é a multidisciplinaridade, permitindo serem utilizados em diversas áreas, nas quais podemos citar: engenharia civil, arquitetura, medicina, vestuário desportivo e equipamentos de alto desempenho, isolamento acústico, anti explosivos, filtros, dentre outros. O seu elevado potencial faz com que a sua gama de aplicações esteja em constante crescimento [22, 37, 39].



Figura 3 - Tecido auxético em repouso (a) e tensionado (b) (adaptado de [38])

O efeito auxético confere aos materiais muitos benefícios, nos quais se destacam: aumento da rigidez, melhoria da tenacidade à fratura e melhoria da rigidez de corte [40-43]. Steffens descreve que estruturas de tecidos ou malhas que utilizem fibras auxéticas de mono ou multifilamentos apresentam uma gama de aplicações superiores que tecidos e malhas oriundos de fibras com propriedades elásticas convencionais [37].

2.2. Materiais com memória de forma

Segundo Tao [44], os materiais com memória de forma – SMM (*shape memory materials*) são considerados materiais inteligentes, porque são sensíveis a estímulos externos, sejam químicos, mecânicos, térmicos, eléctricos, magnéticos ou outras forças, e reagir a estes estímulos, mudando seu comportamento e forma a determinadas circunstâncias previamente programadas [45].

Quando um SMM se encontra memorizado a uma determinada forma, sendo posteriormente deformado, na maioria das situações, por forças mecânicas, este material através de estímulos externos do meio ambiente, de natureza física, têm a capacidade de recuperar a sua forma previamente programada. Segundo Bonnot [46], o que ocorre é que os fatores físicos exteriores ao material estimulam o efeito de memória de forma – “*Shape Memory Effect*” (SME) do material, o qual torna o material capaz de responder e transformar-se de maneira específica a uma determinada: forma, posição, força, rigidez, frequência natural, humidade, fricção, previamente programadas. Um material com memória de forma é um elemento que deve voltar à sua forma previamente memorizada após a aplicação de um estímulo, sem que ocorram deformações. Na interpretação de Nurveren [47] em ambas as situações, o efeito de memória de forma de um material com memória de forma só será observado se o estímulo for suficiente para o material alcançar a temperatura de transição [47].

O interesse nos materiais com memória de forma deve-se à característica de material inteligente atuador que responde a um impulso gerado pela função sensorial do material.

De acordo com Zhong & Yeong [48], o primeiro material com memória de forma – SMM foi descoberto em 1932, quando foram observadas habilidades de super elasticidade numa liga metálica de ouro-cádmium. Entretanto, somente em 1950, se descobriu que o efeito de memória de forma – SME poderia ser utilizado para o desempenho de trabalho físico, tendo-se direcionado as investigações para a descoberta da liga metálica índio-titânio, por apresentar capacidades similares de recuperação de forma.

Somente em 1963, através dos trabalhos de investigação de Buehler e dos parceiros do *U.S. Naval Ordnance Laboratory*, se descobriu que a liga metálica níquel-titânio (NiTi), com composição de 53 a 57% de níquel na sua composição, exercia um papel de efeito de memória

de forma, possuindo propriedades superiores relativamente às descobertas anteriormente realizadas, as quais, para além de serem tóxicas, possuíam custos elevados [49].

Desde a utilização industrial das ligas metálicas com memória de forma tais como o NiTi em meados de 1970, e a após a invenção do poliuretano com memória de forma - *shape memory polyurethane* (SMPU), em 1988, pela MHI (*Mitsubishi Heavy Industries*). Os materiais com memória de forma de um modo geral têm despertado crescente interesse comercial em praticamente todas as áreas industriais, assim como tem gerado inúmeras oportunidades de atuação e desenvolvimento de novos produtos na área têxtil.

Uma das principais características das ligas metálicas de NiTi (Níquel-Titânio), além de não serem tóxicas, possuem menor custo e melhor relação deformação/recuperação. Após a invenção da liga de NiTi, surgiram as ligas metálicas de cobre-alumínio-níquel, cobre-ouro-zinco, cobre-titânio, cobre-zinco-alumínio, cobre-zinco, níquel-alumínio, ferro-platina, manganês-cobre, entre outras.

Segundo Bonnot [46], exceto as ligas metálicas, que foram as primeiras a apresentarem o efeito de memória de forma, existe ainda uma variedade de outros materiais que também possuem estas propriedades de memória de forma, tais como os polímeros, as cerâmicas e os géis. Entretanto, de entre estes materiais, o foco principal tem sido essencialmente o desenvolvimento das ligas metálicas com memória de forma - (SMA), à base de NiTi, e dos polímeros com memória de forma (SMP) à base de poliuretano. A liga metálica que possui maior potencial de memória de forma é a de NiTi (níquel-titânio), devido às suas propriedades relativas às forças de recuperação da forma. No caso dos polímeros com memória de forma, o polímero que se tem destacado nas aplicações de memória de forma é o poliuretano com memória de forma - *Shape Memory Polyurethane* (SMPU). O principal destaque dos poliuretanos com memória de forma deve-se essencialmente ao alto teor de elasticidade, fácil maleabilidade, bem como à alta força de recuperação da forma, em diferentes temperaturas.

Segundo Vigo [45], o conceito de “materiais fibrosos inteligentes” para têxteis ou substratos fibrosos foi primeiramente reconhecido, demonstrado e patenteado em 1979, no Japão, por Mizushima [50] com o desenvolvimento de um fio de seda com memória de forma e,

posteriormente, em 1988, com o desenvolvimento e patenteamento pela *Toray Industry* [51] de um tecido termo cromático que mudava de cor de acordo com a temperatura.

O processo desenvolvido para obtenção de um fio de seda com memória de forma, patenteado por Mizushima [50] conforme demonstrado na Figura 4, iniciou-se mergulhando o fio de seda normal numa solução de proteína hidrolisada, seguido pelo processo de secagem, frisagem, mergulhando em água seguidamente e aplicado tratamento térmico a alta pressão no estado húmido. Observou-se que o fio em estado húmido quando era aquecido a 60° C, o mesmo tornava-se frisado e inchado; e quando o mesmo fio era secado, tornava-se liso e desenrolado [52].

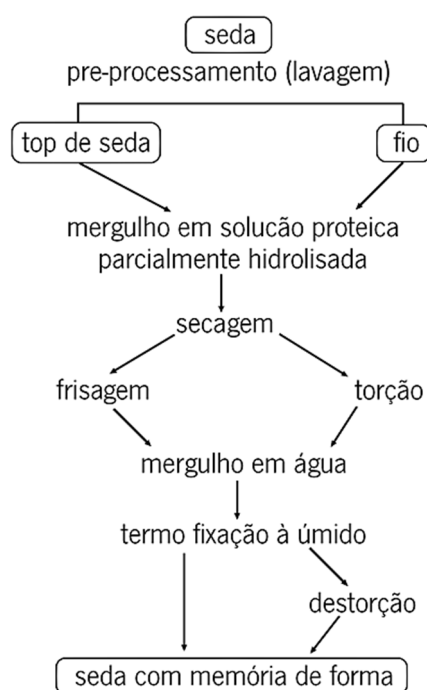


Figura 4 - Processamento de seda com memória de forma (adaptado de [52])

Por outro lado, segundo Vigo [45], há um conjunto de outros desenvolvimentos que ocorreram no Japão, antes de 1980, que podem ser classificados como processos de produção de materiais fibrosos inteligentes. A micro encapsulação de carboneto de zircônio em fibras de poliéster ou de poliamida produziu um material chamado Solar α , que absorvia a radiação solar na zona visível e convertia em calor (como radiação infra vermelha) a qual era dissipada sob o tecido feito com este material, como se mostra na Figura 5. O calor dissipado e a irradiação de calor do corpo ficavam armazenados sob a estrutura interna do vestuário, não permitindo ser transportado para a camada exterior do mesmo. Foi uma solução ideal para utilização em

condições de frio. Entretanto, a desvantagem é que necessitava de luz solar suficiente para ativar o sistema que possuía apenas um sistema de memória de forma (*one-way shape memory*), não retornando ao estado normal com o incremento da temperatura.

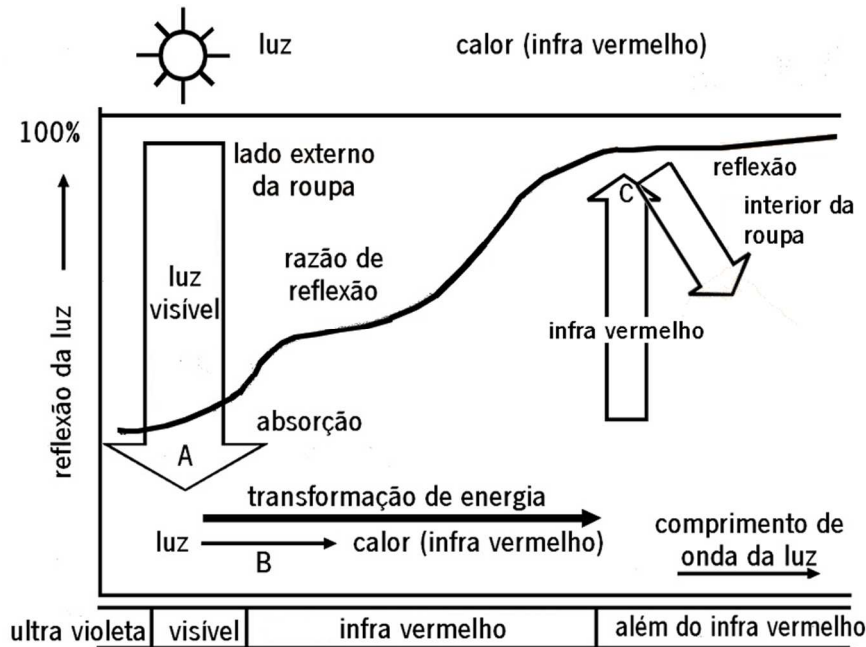


Figura 5 - Absorção de calor e isolamento solar α (adaptado de [52])

Segundo Vigo [45], há uma variedade de formas em que materiais fibrosos inteligentes poderão ser desenvolvidos e avaliados. Uma primeira forma seria o desenvolvimento de um substrato fibroso que respondesse a estímulos externos, tais como temperatura, aplicação de carga, solventes ou pH. Estes materiais fibrosos inteligentes poderiam ser desenvolvidos para responderem da mesma maneira para mais que um estímulo externo (contrair com o aumento da pressão ou temperatura). Poderiam também ser desenhados para responderem diferentemente a diferentes estímulos externos, como os tecidos polióis, mostrados na Figura 6, que têm a capacidade de mudar a capacidade de amortecimento termal em temperatura, e reversivelmente contraem e expandem quando expostos em solventes polares.

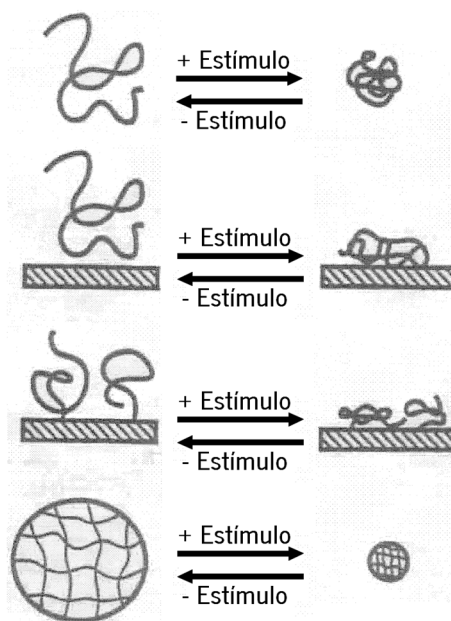


Figura 6 - Exemplo esquemático de um polímero com memória de forma em solução, sob uma superfície e como hidrogel (adaptado de [53])

Segundo o autor, a segunda forma de classificação dos desenvolvimentos destes materiais poderia ser de acordo com a sua função, primeiramente como um sensor e/ou atuador, onde esta função poderia ser descrita, como material inteligente que responde de uma única forma (*one-way*).

O terceiro método de classificação, segundo Vigo [45], situa-se sobre a aplicação final dos materiais fibrosos inteligentes. Para aplicações militares, poderão ser utilizados para diversos fins, como: reparação de uniformes, tendas, pneus e outras estruturas fibrosas e elastoméricas, como camuflagens através do termocromismo, tecidos que se adaptam às diversas mudanças de temperaturas e que possuem efeitos fotocromáticos, além de compósitos de fibra de carbono em aeronaves e outras aplicações militares, a fim de minimizar ou reduzir as vibrações que levam a falhas funcionais.

Na área biomédica, estes materiais podem ser utilizados para a aplicação em ligaduras inteligentes, podendo ser usados em queimaduras e tratamentos de feridas, dispositivos médicos intracorpóreos que podem adaptar-se a mudanças no metabolismo do corpo e funções, capaz de distribuir drogas e enzimas para o paciente de maneira mais adaptativa possível. Há também uma variedade de aplicações para os materiais têxteis inteligentes, no tocante a agricultura, horticultura e consumo.

Na classe dos SMM's, os SMA's são uma classe de metais sensíveis que tem a habilidade de memorizar uma forma pré-programada quando estimulado pelo calor ou pela corrente elétrica [54], exibindo propriedades únicas de recuperação de forma (*Shape Memory Effect* - SME) e pseudo-elasticidade, assim como, alta resistência à fadiga, e efeito amortecedor [55].

Os principais motivos que tem levado à utilização em larga escala de ligas com memória de forma são principalmente as propriedades de memória de forma, excelente biocompatibilidade, capacidade de recuperação de forma a 100%, ótima resistência, tanto à corrosão quanto mecânica, além de excepcional pseudo-elasticidade. Por outro lado, uma das principais desvantagens está diretamente relacionada com a baixa força de recuperação da forma, de aproximadamente 8% [56]. Por outro lado, a indústria tem recentemente despertado interesse pelos polímeros com memória de forma, principalmente por apresentarem leveza no material, fácil manipulação, alta força de recuperação da forma, excelente processabilidade e estabilidade de forma, além de baixo custo quando comparado às ligas metálicas com memória de forma.

No cenário atual, apesar dos polímeros com memória de forma apresentarem vantagens em relação às ligas metálicas com memória de forma, quanto à leveza, toque, custo de processamento, bem como relativamente às propriedades do material, ainda não é perceptível a utilização deste material pela indústria de transformação. A produção de fios poliméricos com memória de forma ainda não está disponível no mercado, dificultando a sua aplicação principalmente na área têxtil [57].

2.2.1. Propriedades das ligas metálicas com memória de forma – SMA

As ligas metálicas com memória de forma têm despertado elevado interesse científico e têm sido utilizadas em diversos setores da indústria, principalmente devido às suas propriedades termomecânicas, relacionadas com a pseudo-elasticidade e com o efeito de memória de forma, que estão diretamente associadas com a maneira como ocorre a fase de transformação martensítica do material – MPT [58].

O material quando se encontra na fase de transformação martensítica, é considerado em estado bifásico sem difusão e está baseado no processo do movimento dos seus átomos, originando contração, alongamento e cisalhamento ao longo dos planos da liga metálica. Esta fase possui duas fases estáveis: a fase martensite, que corresponde ao estado cristalino da estrutura quando se encontra a baixas temperaturas; e a fase austenite, que corresponde ao estado cristalino da estrutura quando se encontra a altas temperaturas, além da forma memorizada do material [56, 59].

Nas ligas metálicas com memória de forma, o efeito de memória de forma ocorre quando a liga é aquecida ou arrefecida sob as temperaturas de transição específicas, nesta gama de temperatura, o material passa por processamento termomecânico de memorização, e fixação à uma determinada forma, através de tratamento de calor a altas temperaturas [60]. Após o arrefecimento, a liga metálica com memória de forma pode ser mecanicamente esticada, amassada, e deformada para diferentes formas, no entanto, aquela forma que foi memorizada, através do processo de aquecimento moderado, assim que o material atinja a temperatura correspondente ao efeito de memória de forma, aquela forma memorizada será recuperada. Segundo Hu [61], os materiais com memória de forma possuem a habilidade de recordar uma forma pré-determinada mesmo depois de várias e severas deformações. De acordo com Nurveren [47], o tratamento termomecânico ao qual o material com memória de forma é submetido, influencia diretamente o comportamento da fase martensítica, bem como a temperatura de transição do material com memória de forma.

2.2.1.1. Efeitos de memória de forma simples e duplo

O efeito simples de memória de forma (*one-way shape memory effect*) ocorre quando um material mecanicamente deformado, obedece a um processo de recuperação da forma sob aquecimento, e posteriormente após o resfriamento, não ocorre uma mudança reversa de forma, então o modelo precisa novamente ser tensionado mecanicamente sob efeito de uma força externa para que se repita o efeito de memória de forma. No efeito de memória de forma duplo, denominado como “*two-way shape memory effect*” (TWSME) [58], ocorre a transformação espontânea da forma do material tanto durante o aquecimento quanto no resfriamento, se houver qualquer esforço externo [62]. O efeito de memória de forma dupla não é uma característica intrínseca do material, mas sim adquirida através da repetição cíclica de movimentos termomecânicos. Por outro lado, as ligas metálicas que apresentam um efeito de memória de forma duplo possuem menor força durante o processo de recuperação da forma, e as forças de recuperação a baixas temperaturas são significativamente menores, em comparação aos valores do efeito de memória de forma encontrados nos materiais de efeito de forma simples [56, 63].

2.2.1.2. Fases de transformação

As fases de transformação da estrutura cristalina de uma liga com memória de forma durante a mudança decorrente entre as fases martensite e austenite foram estudadas por Honkala [63] e explicadas por Laschuk [56], conforme ilustrado na Figura 7 representando uma barra de NiTi deformada mecanicamente.

O material quando se encontra na forma austenite (Figura 7A), a altas temperaturas, a estrutura é cúbica, e apresenta forte simetria, permitindo a memorização da forma do material.

Seguidamente ao processo de memorização, o material é submetido ao processo de arrefecimento (Figura 7B) até alcançar a fase martensite inicial - M_s (*Martensite Start Temperature*). Durante o arrefecimento, quando a liga atingir uma temperatura inferior a temperatura martensite final - M_f (*Martensite Finish Temperature*), esta atinge um estado onde apresenta maciez e maleabilidade, apta a ser mecanicamente deformada para uma nova forma temporária. Durante o processo de resfriamento, a fim de manter a forma, a estrutura interna que se encontra em forma cristalina, é acomodada para uma forma estrutural tipo diamante

objetivando acomodar um estado mínimo de energia mantendo a forma memorizada da estrutura.

Quando o material ainda na forma martensite, é deformado para uma forma temporária (Figura 7C), a estrutura molecular da liga metálica minimizará a energia, continuando o movimento de contorno das moléculas.

À medida que o material é aquecido, para além da temperatura martensite inicial A_s (Austenite Start Temperature) (Figura 7D), inicia-se a mudança de fase martensite para a fase austenite, e a liga metálica retorna à sua estrutura cristalina original previamente programada até atingir a temperatura austenite final A_f (Austenite Final Temperature), e consequentemente à sua forma.

Posteriormente, com o decréscimo da temperatura, acontece o arrefecimento do material e este volta à fase martensite novamente conforme demonstrado na (Figura 7E).

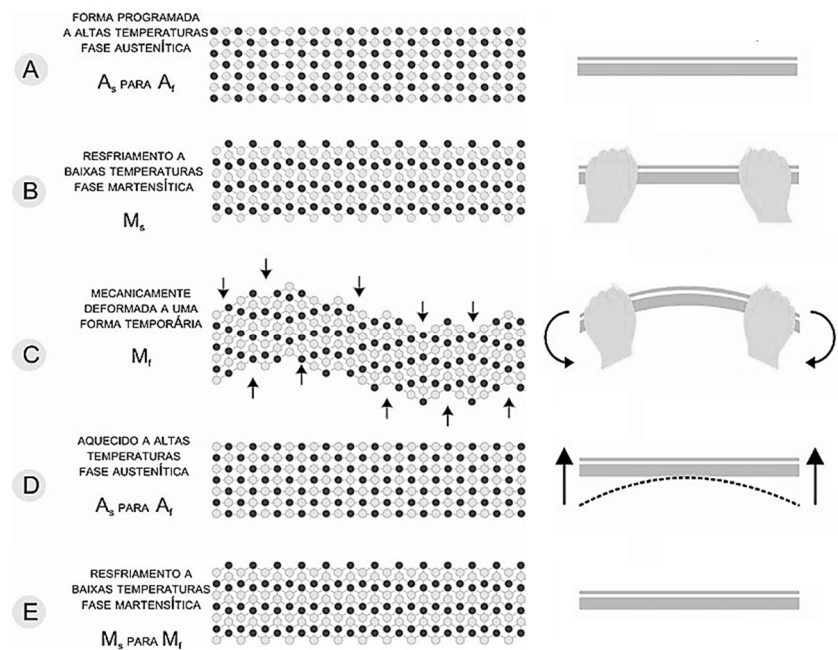


Figura 7 - Esquema ilustrativo a cerca da fase de transição e da estrutura cristalina de uma liga metálica com memória de forma (adaptado de [63])

2.2.1.3. Curva de histerese dos materiais com memória de forma

Honkala [63] descreve que a curva de histerese dos materiais com memória de forma é definida como sendo a diferença entre as temperaturas nas quais o material é transformado da fase martensite para a fase austenite quando aquecido, e transformado da fase austenite para a fase martensite quando arrefecido.

Hesse [64] demonstra graficamente que a curva histerese de um material com memória de forma ocorre quando na fase martensite este é aquecido, transformando-o da fase martensite para a fase austenite e vice-versa. Inicialmente, à medida que há um aumento na temperatura do material, em que o fenómeno de transformação começa a acontecer, este ponto é denominado como temperatura austenite inicial (A_s); quando o material recupera completamente a forma, significa que ele passou totalmente da fase martensite para a fase austenite, este ponto é considerado como temperatura austenite final (A_f); posteriormente, enquanto o material ainda se encontra na fase austenite, iniciando o processo de arrefecimento, e inicia-se o processo de acomodação das moléculas, tornando a liga mais maleável, e apta a deformações mecânicas, indica que o material entrou na fase martensite e é denominado este ponto como temperatura martensite inicial (M_s); e finalmente, a temperatura correspondente na qual o material encontra-se completamente revertido à fase martensite, este ponto é chamado de temperatura martensite final (M_f), conforme esquema demonstrado na Figura 8.

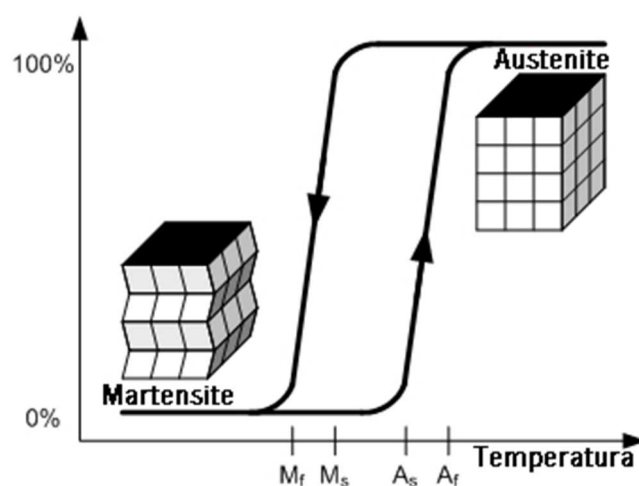


Figura 8 – Curva de histerese (adaptado de [64])

2.2.1.4. Pseudo-elasticidade dos materiais com memória de forma

A pseudo-elasticidade, ou super-elasticidade, é o termo utilizado para descrever as aparentes deformações elásticas dos materiais durante a fase austenite. Estas propriedades estão referenciadas como sendo das mais importantes para as vastas aplicações comerciais nas quais as ligas com memória de forma são exploradas comercialmente [65].

Esta propriedade é caracterizada pela quantidade de força que o material suporta, sendo que as ligas com memória de forma chegam a possuir um montante de força elástica em torno de vinte vezes maior em comparação com os materiais convencionais. O comportamento pseudo-elástico do material exige um treinamento similar ao do efeito de memória de forma, em que o material é exposto a um processo de memorização à alta temperatura e arrefecido posteriormente. O efeito de memória de forma está intimamente ligado à transformação interna da estrutura cristalina da liga metálica, que acontece inicialmente na fase austenite, e com a aplicação de esforço externo modifica o material passando a fase martensite. Imediatamente, caso ocorra a anulação da carga, ocorrerá a transformação reversa, e a deformação desaparecerá sem que seja necessário a aplicação de calor [56, 66].

Alguns autores utilizam o termo pseudo-elasticidade para referir o efeito amortecedor que ocorre entre a mudança da fase austenite para a martensite. O efeito de pseudo-elasticidade entre a fase austenite, que ocorre à alta temperatura no qual a estrutura possui cadeia molecular geralmente cúbica e a fase martensite, que ocorre à baixa temperatura, com estrutura apresentando pouca simetria e muito deformável, conforme esquema representando um clips, apresentado na Figura 9 [67].

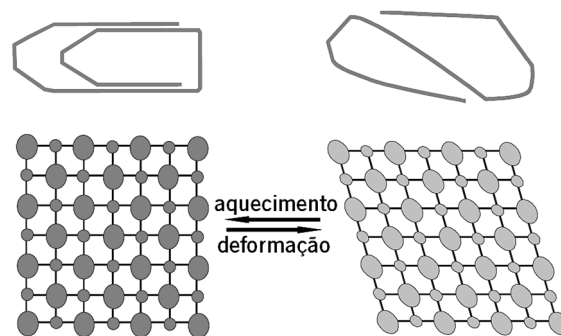


Figura 9 - Ilustração do efeito de pseudo-elasticidade de um clipe com memória de forma (adaptado de [68])

2.2.1.5. Efeito amortecedor

Segundo Boussu & Petitniot [69] as ligas com memória de forma apresentam capacidades de amortecimento superiores em relação aos outros materiais [70]. Estes autores verificaram que este fenómeno ocorre porque a capacidade de amortecimento que resulta da dissipação de energia mecânica por fricção interna, é alta no domínio da mudança de fase martensítica do material e é ainda mais alta na zona de transição, onde as fases martensite e austenite coexistem, tal como ilustrado na Figura 10.

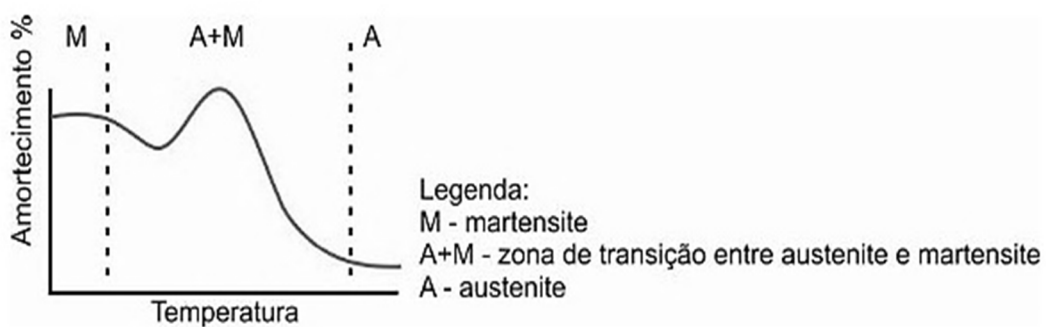


Figura 10 – Efeito amortecedor (adaptado de [69])

Segundo Boussu [69], o amortecimento emitido a partir da dissipação de energia mecânica por atrito interno, é muito elevada no domínio martensítico puro, mas pode ser ainda mais importante na zona de transição onde as fases martensita e austenita coexistem. O amortecimento de choque é mais eficiente na zona de transição, ao passo que o amortecimento de vibração contínua praticamente inexistente no domínio martensítico, tornando o Níquel-Titânio um composto muito interessante para utilização como atuadores que necessitem de alta densidade de energia de acionamento.

As potenciais capacidades de amortecimento de choque – SOC do NiTi é de 15%, enquanto que a da liga Cu-Zn-Al é de 30%. Em contrapartida, apesar de possuir excelente capacidade de amortecimento, esta última liga apresenta propriedades mecânicas pobres nas quais praticamente não é mais produzida.

2.2.2. Liga Níquel-Titânio (NiTi)

Dentre as diversas ligas metálicas com SME que têm sido desenvolvidas, as que têm obtido maior sucesso na utilização industrial são as ligas metálicas à base de níquel-titânio (NiTi), cobre-zinco-alumínio (CuZnAl) e cobre-alumínio-níquel (CuAlNi), por satisfazerem substancialmente critérios de força de recuperação da forma, justificando o maior interesse comercial.

As ligas metálicas à base de cobre, principalmente por possuírem baixo custo em relação à processabilidade e matéria-prima, além de capacidade de aplicação num abrangente campo de temperaturas de transição, têm sido largamente utilizadas no setor industrial. Entretanto, apesar das inúmeras vantagens que as ligas metálicas à base de cobre possuem em comparação as ligas de níquel-titânio, principalmente quanto ao custo, processabilidade e ao abrangente leque de temperaturas de transição, as ligas de NiTi apesar de possuírem alto custo e complexidade de fabricação, são amplamente utilizadas principalmente como biomateriais, e principalmente em aplicações no setor industrial devido às suas excelentes propriedades de memória de forma superior a 8% e excelentes propriedades de pseudo-elasticidade [71]. A liga NiTi apresenta grande potencial de aplicação na área médica, principalmente por possuir excelente biocompatibilidade, resistência à corrosão, além de alta ductilidade, resistência eléctrica e capacidade de amortecimento [70].

De acordo com Nurveren [47], as propriedades mecânicas das ligas metálicas à base de NiTi são de modo geral, determinadas pela sua composição química, todavia, existem alguns fatores que influenciam as características de quanto as propriedades de transformação martensítica desta liga, tais como o tratamento termomecânico dado ao material, o conteúdo de níquel na composição, o ciclo térmico, além da adição de diferentes elementos metálicos ternários envelhecidos e diferentes técnicas de processamento. Segundo Boussu [69], pode-se melhorar algumas propriedades das ligas metálicas à base de NiTi, como a redução da curva histerese através da adição de pequenas quantidades de ferro e cobre, bem como aumentar a temperatura austenite final por meio da adição de nióbio.

2.2.2.1. Aplicações da liga NiTi

Apesar da descoberta acidental da liga NiTi ter acontecido nos anos de 1960 por Buehler et al. [72] do Naval Ordnance Laboratory, bem como suas propriedades de memória de forma, a primeira aplicação industrial desta liga em escala industrial somente aconteceu no ano de 1971 [73-75], para conectar a tubagem hidráulica na aeronave Grumman F-14 das forças armadas dos Estados Unidos [65, 76]. Desde a primeira utilização, houveram milhares de patentes, porém poucas com sucesso comercial, possivelmente devido à difícil processabilidade do material que implicava a produção industrial em larga escala. As ligas metálicas com memória de forma têm sido largamente utilizadas e estão em plena expansão [77] nas áreas da medicina [78, 79], ortodontia [80], telecomunicações [79], automóvel [81] e industrial [65]. Contudo está a ser usado cada vez mais em produtos de uso diário, inclusivamente nas áreas têxtil, moda e vestuário [82].

2.2.2.2. Aplicações do NiTi na área têxtil

As ligas metálicas à base de NiTi têm sido de modo geral, pouco utilizadas na área têxtil, entretanto, encontram aplicações pontuais principalmente em aplicações onde se requer funcionalidade do material, bem como na área do design.

O conjunto de propriedades relacionadas com as ligas metálicas de NiTi, tais como baixa maleabilidade, flexibilidade, quando associada à elevada resistência são os principais fatores que prejudicam a tricotabilidade nas máquinas têxteis, bem como no manuseio. Uma das alternativas descritas por Stylios [83] a fim de melhorar a processabilidade do material, seria a inserção em conjunto de fios de NiTi com fios não metálicos, bem como o recobrimento do fio metálico com outros fios que permitam melhorar a processabilidade do material [84].

De acordo com Zhu [85], potenciais aplicações para os metais com memória de forma, são para roupas especiais de proteção contra fogo, tais como: bombeiros, pilotos de corridas, militares em tanques de guerra, especialmente para quem possa a qualquer instante, acidentalmente estar exposto ao calor intenso. Outra função dos SMA's em vestuário é o controlo dos efeitos do meio ambiente, no concernente ao controlo de temperatura do meio interior/exterior do

vestuário. Para esta funcionalidade, o vestuário deve agir no sentido inverso da aplicação de proteção ao calor. Ou seja, quando a temperatura externa diminui, o vestuário deverá ter a capacidade de aumentar o espaço interno entre as camadas, aumentando o espaço de ar, criando propriedades de isolamento térmico. Para este sistema, requer um tipo SMA atuador de memória de forma duplo (*two-way*).

Segundo Laschuk [56], as ligas com memória de forma têm sido aplicadas na área têxtil, tanto para fins de funcionalidade do material, como na área do design de moda, devido às propriedades mecânicas e térmicas que este tipo de material possui. Dentre as aplicações relativas à funcionalidade do material, destacam-se o vestuário de proteção balística, produzido inicialmente pelo laboratório francês, o GEMTEX, tecidos com memória de forma produzidos com a utilização de fios de NiTi na estrutura, conforme mostrado na Figura 11. O tecido patenteado é composto por 100% níquel e titânio, os quais evidenciam elevada capacidade de amortecimento [86] e efeito de pseudo-elasticidade [69]. A utilização deste tipo de tecido é principalmente na balística, pois a sua estrutura possui propriedades de amortecimento, resistência e elasticidade, fatores importantes no comportamento do material utilizado para este fim. A fim de melhorar a processabilidade, bem como agrupar propriedade de resistência ao impacto de alta velocidade, foram utilizados fios de aramida juntamente com fios de NiTi durante o processo de tecelagem.

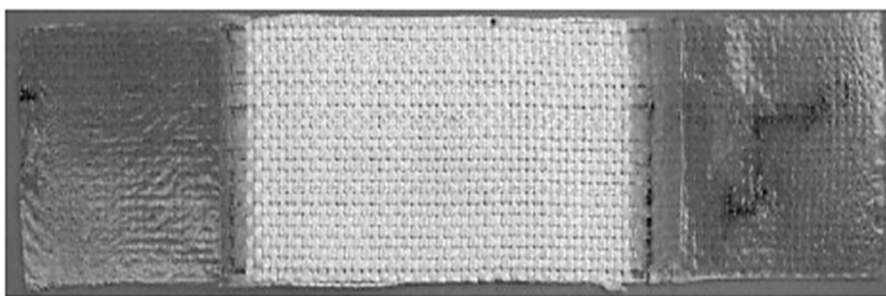


Figura 11 - Tecido SMA de NiTi GEMTEX (adaptado de [69])

Congalton [87] descreveu acerca de outra utilização de fios compostos de ligas metálicas de NiTi como material funcional na área têxtil, a qual está relacionado com a aplicação em vestuário de proteção contra o fogo e em vestuário termicamente ativado. Segundo o autor, este método que permite a proteção contra chamas e isolamento do calor excessivo, foi desenvolvido pelo “*Defence Clothing and Textiles Agency, Science and Technology Division*”, através da idealização de um tecido composto de duas camadas e interligados por fios de NiTi que deformam e

expandem em forma de mola de acordo com a temperatura à qual o tecido é exposto, conforme mostrado na Figura 12. Este tipo de estrutura proporcionou o isolamento necessário para garantir o conforto termo fisiológico do utilizador em situações de combate a incêndio. Congalton [87] descreve que o fio de NiTi deformado na forma de mola cônica, possui temperatura de transição de 50° C é colocado entre as duas camadas de tecido. Este tipo de utilização de NiTi no isolamento térmico é baseado no conceito de que a mola se expandirá quando o utilizador for submetido ao calor intenso, formando uma camada de ar isolante [87], protegendo o utilizador.

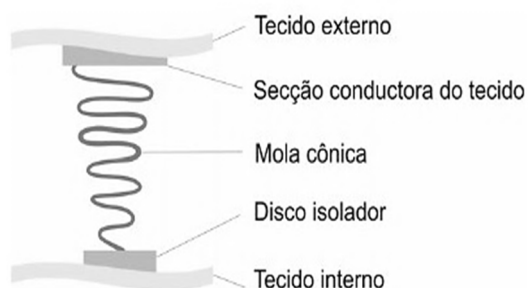


Figura 12 - Esquemática da mola de SMA entre duas camadas de tecido [87]

Villa et al [88] estudou a influência de fios de NiTi nas propriedades mecânicas de estruturas têxteis híbridas, compostas por poliamida (PA), elastano (PU) e fios finos de NiTi. As estruturas foram produzidas utilizando um tear circular de malha de trama. Foram utilizados fios superelásticos de NiTi com diâmetro de 50 µm memorizados na forma linear e na forma de espiral. Foram utilizados filamentos de poliamida de 140 µm de diâmetro, enquanto que a estrutura têxtil foi composta por vários filamentos de poliuretano, caracterizadas por diferentes diâmetros. Foram realizadas medições de força sobre o alongamento correspondente até 150%, bem como testes de recuperação da deformação sob carga em função da temperatura.

Neste estudo, concluiu-se que a estrutura de fios NiTi-PA-PU, com diferentes tipos de fios NiTi, apresentaram boas propriedades elásticas, enquanto que a presença dos fios NiTi aumentou a espessura do tecido. Concluiu-se que será de suma importância, para estudar em profundidade a influência dos fios de NiTi noutras condições micro estruturais (sem tratamento térmico ou programado sob diferentes tipos de formas). Também concluíram que testes em flexão ou torção serão importantes para uma caracterização completa deste tipo de estrutura. Os testes dinâmicos em função da frequência mostraram notáveis propriedades de amortecimento, que sugerem estudos futuros, para obter uma descrição exhaustiva do material a partir de vários pontos de vista.

Em testes de recuperação da tensão a carga constante, os tecidos mostraram boas propriedades somente quando realizados em baixas cargas aplicadas. Foi sugerido para as atividades futuras, tentar melhorar este aspecto, mudando o tratamento térmico dos fios de NiTi, buscando um melhor desempenho em termos de recuperação sob carga aplicada [88].

Villa and Fanguero [89], estudaram as propriedades de resistência à tração, compressão e resistência ao enrugamento de stents produzido a partir de filamentos de poliéster e de poliamida entrançados em conjunto com NiTi. Utilizaram uma máquina de entrançar composto de 16 fios na vertical. Vários modelos de stents trançados foram desenvolvidos, variando a composição dos materiais (PES, PA, NiTi), o ângulo de trança (25°, 35°, 45°) e diâmetro dos fios (0,27 mm, 0,35 mm, 0,55 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm). Os resultados obtidos nos ensaios, quanto ao comportamento mecânico e biocompatibilidade, demonstraram potencial capacidade de utilização como stents.

Vasile et al [90] estudou a eliminação ou diminuição de vincos em tecidos de linho através da inserção de fios de NiTi na estrutura durante o processo de tecelagem. Foram utilizados fios de linho e de NiTi com 300 µm e com temperatura de transformação martensítica em torno de 37° C na estrutura que foi confeccionada em tear manual. A espessura, a recuperação de rugas, estabilidade dimensional, bem como a coesão dos fios de NiTi no tecidos foram testados. Todos os testes foram realizados antes e depois de um ciclo de lavagem, tanto para o tecido híbrido, bem como para o tecido de referência. Foi observado um aumento na espessura dos tecidos após a lavagem; a estabilidade dimensional para os tecidos foram claramente evidenciados após o processo de lavagem, os quais após serem submetidos à presença da temperatura mostraram que os tecidos que continham fios de NiTi na estrutura apresentou uma considerável diminuição do vinco, conforme mostrado na Figura 13. Segundo Vasile, deve ser dada atenção especial tanto aos diâmetros adequados dos fios de NiTi e os demais, bem como ao processo de tecelagem, e o padrão nas quais permitam a recuperação adequada do tecido, evitando um efeito não desejado.

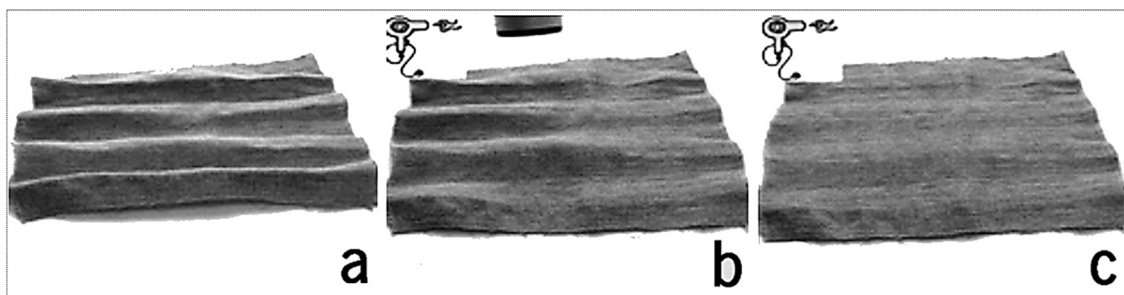


Figura 13 - Recuperação do vinco após o período de tempo: a) $t = 0$ s, b) $t = 8$ s, c) $t = 23$ s (adaptado de [90])

Winchester e Stylios [91] descreveram acerca de como a liga de memória de forma à base de NiTi pode ser projetada para fornecer novos conceitos de design que melhoram a estética de tecidos de malha para vestuário. O estudo centra-se na gama de técnicas e processos utilizados para acomodar as características e exigências específicas da liga de memória de forma e descreve uma nova abordagem para a construção da concepção global. Segundo os autores, a aplicação de materiais com memória de forma nos têxteis, não se limita a apenas ao vestuário de moda. A sua inclusão em roupas desportivas como uma ajuda ao desempenho fisiológico e conforto, bem como nos têxteis biomédicos, ou seja, em ligaduras de compressão, poderiam ser as potenciais áreas de investigação, enquanto que nas artes do espetáculo de teatro e cinema, esta tecnologia poderia também ser usada para criar roupas com atributos estéticos únicos. Nesta pesquisa, a contribuição da SMA para a indústria têxtil é mais voltada para a componente estética do que para o desempenho e funcionalidade do material, conforme mostrado na Figura 14.

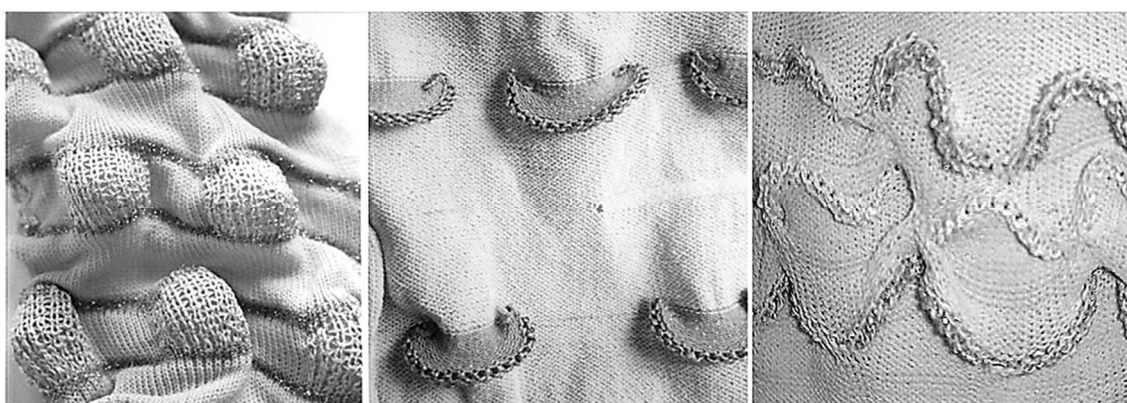


Figura 14 – Efeito tridimensional numa estrutura de malha (adaptado de [91])

Um dos lançamentos à cerca de tecidos inteligentes que revolucionou o mercado do vestuário, foi uma calça que se adequa ao conceito do utilizador, denominada “*auto snug clothing*”. Esta peça é feita a partir de um tecido criado com fios de SMA que foi designado como “*metal*”

muscles”, incorporando um conceito de mudança de tamanho, e do estilo do vestuário ao gosto do utilizador através dos fios “*muscles wires*” inseridos no tecido. Os fios de SMA mudam de forma quando uma pequena corrente elétrica é ligada a estes. Quando a roupa se ajusta à forma desejada e na medida pretendida, o utilizador simplesmente desativa a corrente eléctrica e a peça permanece na forma e medida desejadas, conforme mostrado na Figura 15a [92]. Segundo a Philips, esta técnica também poderá ser utilizada em camisas, meias, sutiãs ou qualquer outro artigo do vestuário.



Figura 15 – (a) Calça auto ajustável (adaptada de [93]) e (b) camisa inteligente da Corpo Nove [94]

A propriedade de pseudo-elasticidade dos materiais com memória de forma tem conduzido à utilização das ligas com memória no vestuário. Conhecido como um dos primeiros tecidos produzidos industrialmente no qual foi utilizado materiais com memória de forma na sua estrutura. A Corpo Nove, empresa de moda italiana, desenvolveu e produziu uma camisa utilizando fios de Nitinol® [95], no qual os fios com memória de forma foram entrelaçados juntamente com fios de nylon, durante o processo de tecelagem. A principal invenção é que a camisa não necessita de ser passada ao ferro, porque a temperatura do corpo estimula os fios com memória de forma, os quais são memorizados na forma linear, eliminando a necessidade de passar ao ferro. Outra novidade é que com o aumento/diminuição da temperatura do ambiente, as mangas crescem ou decrescem, como mostrado na Figura 15b, de acordo com a variação da temperatura.

2.3. Polímeros com memória de forma

Os polímeros com memória de forma (SMP) pertencem a uma classe de materiais inteligentes, que oferecem ação mecânica desencadeada por um estímulo exterior, tal como a temperatura, magnetismo, pH, impulsos elétricos, humidade, luz, entre outros [96-102].

Os polímeros termo ativos, consistem de dois componentes de polímero, resultando em duas fases, uma com uma maior temperatura de fusão do que a outra. O efeito de memória de forma não está relacionado com uma propriedade específica dos polímeros individuais, sendo realizado a partir de uma combinação de estruturas de polímeros e da morfologia destes.

O comportamento de memória de forma pode ser produzido através da combinação da estrutura polimérica e da sua morfologia, através de diferentes composições químicas. Os polímeros com memória de forma após processamento numa determinada forma, assumem uma forma permanente na qual poderão ser deformados para produzir outras formas. Esta deformação para uma ou mais formas temporárias é chamada de “programação”. Assim sendo, os SMP's são capazes de "lembrar" uma ou mais formas, onde cada uma destas é determinada pela elasticidade da rede. Entretanto podem ser armazenadas em formas temporárias através da imobilização do material, comumente pela vitrificação ou cristalização. Como um exemplo simples, um complexo SMP de forma tridimensional pode ser compactado num formato fino (adequado para a inserção de um cateter para o corpo ou para ser introduzido num espaço compacto) por um ciclo de aquecimento, deformação, refrigeração e descarga.

A aplicação de calor, luz ou a exposição a solventes pode provocar um retorno à forma de equilíbrio, adquirindo formas complexas através da mobilização da cadeia em rede. A evolução da tensão ou força, deformação e temperatura durante o ciclo termodinâmico, é referenciado como um *ciclo de memória de forma*, como mostrado na Figura 16, onde inicialmente, a amostra submetida ao processo de aquecimento (*) é deformada para o estado (i) e resfriada através de um gradiente fixo de temperatura até o estado (ii), seguido pela descarga (revelando o grau de tensão fixa) estado (iii), e finalmente a recuperação para o estado original (iv), se a força de recuperação for completa [96].

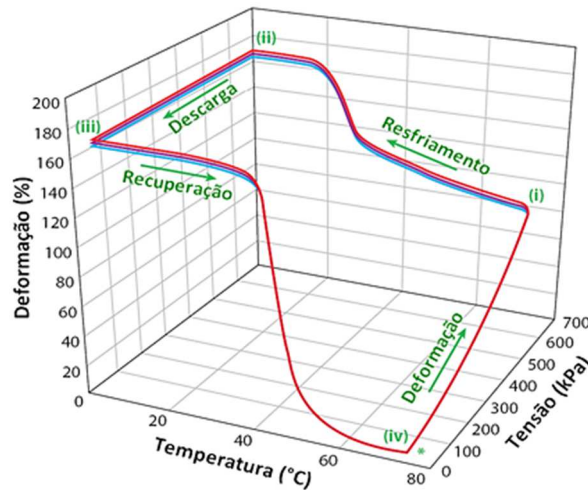


Figura 16 – Ciclo termomecânico de um SMP (Adaptado [96]).

O efeito de memória de forma (SME) não é uma propriedade intrínseca, o que significa que os polímeros não apresentam esse efeito por si só. O SME resulta duma combinação da morfologia do polímero e do processamento específico que pode ser entendido como uma funcionalização do polímero. Pelo processamento convencional, por exemplo, extrusão ou moldação por injeção, o polímero é formado na sua fase inicial, como uma forma permanente B. Posteriormente, passa por um processo de programação, sendo deformado e fixado na forma temporária A. Após a aplicação de uma fonte externa de estímulo, o polímero recupera a sua forma inicial permanente B. Este ciclo de programação e de recuperação pode ser repetido várias vezes, com diferentes formas temporárias, em ciclos subsequentes, tal como ilustrado na Figura 17.

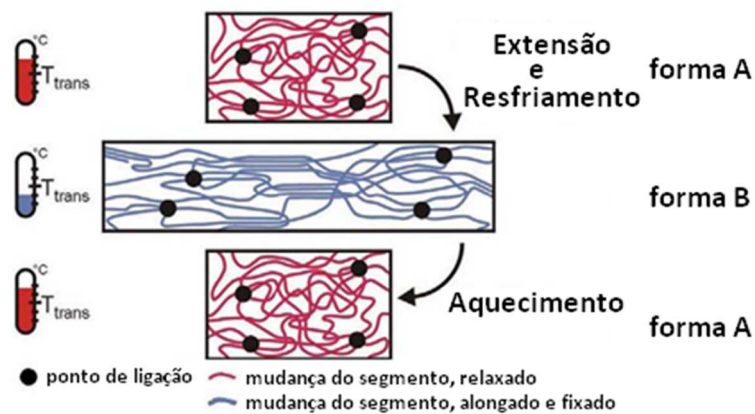


Figura 17 – Mecanismo molecular do SME induzido termicamente. T_{trans} = temperatura de transição termal para a mudança de fase (Adaptado [96]).

2.3.1. Novos materiais e comportamento dos polímeros com memória de forma

Dentre os novos materiais apresentam-se os poliuretanos com memória de forma (SMPU), onde as principais vantagens são o baixo custo e a facilidade de processamento. Entretanto, alguns estudos recentes apontam como desvantagens, a sua baixa condutividade térmica, baixas propriedades mecânicas e redução do desempenho de memória de forma nos primeiros ciclos termomecânicos, para além do alto coeficiente de expansão térmico [103-106]. Diversos estudos têm sido conduzidos a fim de melhorar as propriedades mecânicas dos SMP's, principalmente no intuito de aumentar as forças de recuperação destes materiais através da adição de multicamadas de nanotubos de carbono [107-114].

O crescente interesse por SMP's, quando comparados com SMA's, deve-se principalmente às suas vantagens, tais como: baixa densidade, facilidade de processamento, baixo custo e, principalmente, à altíssima força de alongamento/deformação, em alguns polímeros pode chegar a mais de 700% [115], enquanto que os SMA's, cerâmicas e vidros, possuem entre 10, 1, e 0,1%, respectivamente.

2.3.2. Aplicações dos polímeros com memória de forma

Investigadores têm proposto inúmeras aplicações potenciais para SMP's que incluem desde o vestuário inteligente, aplicações médicas e espaciais, aplicações estruturais inteligentes na engenharia, ferramentas reconfiguráveis [116], sistemas micro eletromecânicos, atuadores, dispositivos biomédicos [117], utensílios de cozinha, interruptores, embalagens inteligentes, tubos termo encolhíveis e biosensores, dentre outros. Na área médica, os implantes de materiais biodegradáveis, assim como os procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos, estão proporcionando uma revolução.

Os SMP's são capazes de alterar a sua forma e tamanho depois de se submeterem a determinados estímulos, principalmente pela temperatura ou luz, permitindo que se possam introduzir no corpo humano próteses e ferramentas cirúrgicas através de incisões minúsculas, quando comparadas com o processo convencional, minimizando os riscos para o paciente. Dentre os diversos materiais de uso médico, destacam-se: suturas inteligentes (mostrado na

Figura 18), cateteres intravenosos, artigos para ortodontia, cabos e espumas para intervenções endovasculares, sistemas de liberação de drogas no organismo, implantes biodegradáveis, solas de sapatos para pessoas com necessidades especiais e ortopédicas, dentre outras [118].

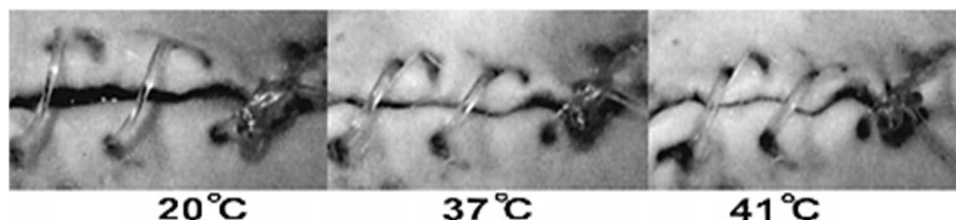


Figura 18 – Estrutura de SMP biodegradável numa experiência em animal mostra a contração do fio enquanto aumenta a temperatura (adaptado de [119])

2.3.2.1. Aplicações dos polímeros com memória de forma na área têxtil

O interesse pelos têxteis inteligentes cresceu exponencialmente nos últimos anos, como evidenciado pelo aumento de informações sobre o processamento e caracterização de fibras com memória de forma. Meng & Hu [107] mostraram que o polímero reforçado com nanotubos de carbono, provou ser útil para o aumento das propriedades mecânicas inclusive aumentando a força de recuperação elástica de fibras de SMPU.

A Mitsubishi Heavy Industries Ltd. produziu e patenteou a sua própria linha de roupas desportivas ativas nomeadas "Diaplex®", produzidas pela aplicação de um polímero de memória de forma à base de poliuretano sensível à temperatura em forma laminada que foi colocado entre duas camadas de tecido, formando uma membrana, que é simultaneamente à prova de água, permeável e respirável, conforme esquema ilustrativo mostrado na Figura 19 [120]. É um material inteligente, capaz de ajustar-se para garantir o mais alto nível de conforto em peças de vestuário, oferecendo características superiores quanto à prova d'água, respirável e anti condensação [121].

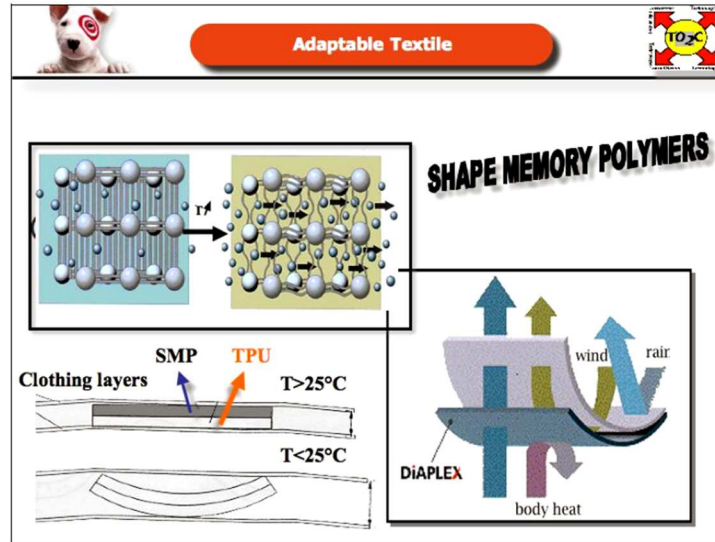


Figura 19 – Membrana adaptativa Diaplex® (adaptado de [120])

De acordo com Parys [120], outro exemplo de um material têxtil é Dermizax®, um tecido inteligente que consiste de uma membrana ultrafina monolítica inovador capaz de controlar eficazmente a permeabilidade ao ar, dependendo da temperatura microclimática. Quando a temperatura aumenta, as aberturas entre as moléculas do polímero na membrana expandem-se, aumentando assim a permeabilidade do tecido ao ar e à medida que a temperatura diminui os poros fecham, não permitindo a passagem de ar, conforme mostrado na Figura 20.

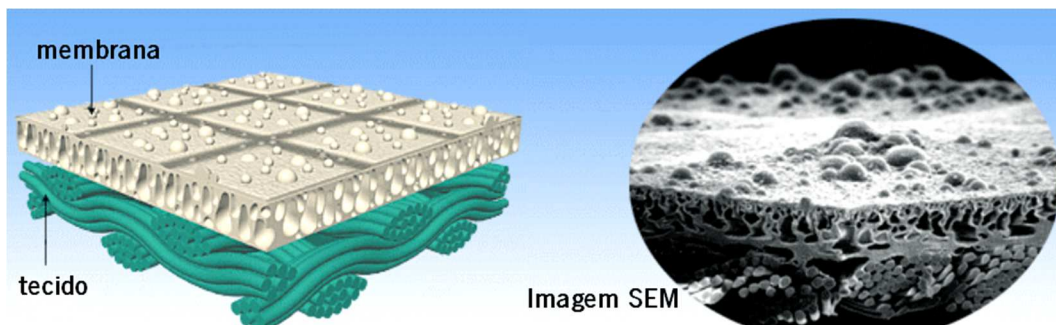


Figura 20 – Ilustração do Dermizax® (adaptado de [120])

Vili [54] estudou a utilização de materiais com memória de forma, aplicados à estrutura de tecido para aplicações em interiores, tais como cortinas, divisórias e tapeçarias. Previu que esses tecidos não só executassem aplicação têxtil estática convencional, mas também seria capaz de sentir, reagir e se adaptar ao ambiente, no qual o tecido da cortina quando estimulado

pela luz solar abre ou fecha a estrutura, permitindo e/ou impedindo a penetração da luz solar no ambiente, mudando de forma, tornando a serem chamados de "têxteis inteligentes", conforme mostrado na Figura 21.

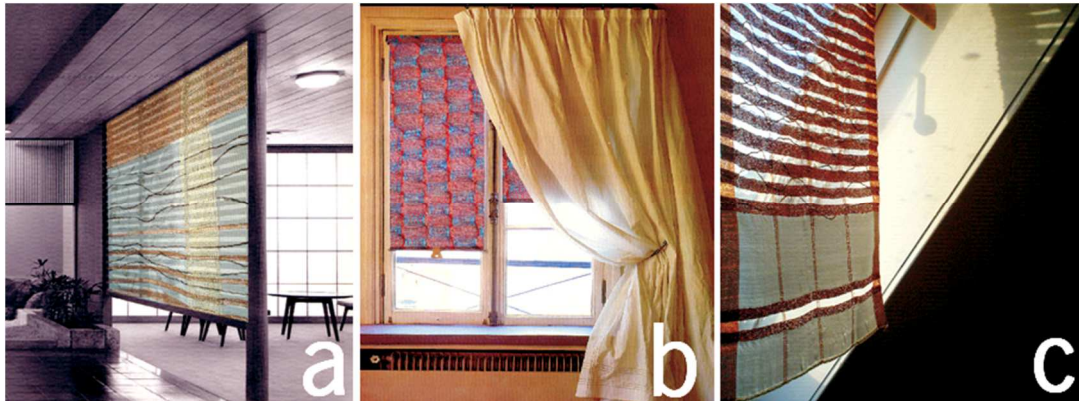


Figura 21 – Estruturas de SMP utilizadas como divisórias (a); e como cortinas (b e c) (adaptado de [54])

Segundo Cook [122], usando fibras baseadas em SMP's, é possível projetar estruturas para maximizar o conforto para todas as condições meteorológicas. Ou seja, projetar uma fibra com uma crescente secção transversal tal que, a temperaturas mais elevadas, a secção transversal se abra para formar um canal na fibra como a forma "permanente", e em temperaturas mais baixas, esta se feche, não permitindo a troca de calor entre os meios exterior e interior.

Os polímeros com memória de forma apresentam vantagens adicionais perante os demais materiais com memória de forma, principalmente por serem, na sua grande maioria, de baixo custo, de fácil manuseio, biocompatíveis, além de serem passíveis de programação à temperatura de ativação, graças à facilidade para desenvolver copolímeros com o emprego de aditivos.

2.4. Conclusões

Esta parte do trabalho de doutoramento correspondeu a uma refinada pesquisa acerca do que tem sido estudado sobre os materiais com memória de forma, as suas propriedades, características e, fundamentalmente, as suas aplicações na área têxtil.

Para realização desta pesquisa bibliográfica, foi realizada uma exaustiva busca em livros, revistas científicas, artigos científicos e demais publicações que estivessem disponíveis nos diversos meios, no intuito de conhecer o que tem sido publicado acerca do comportamento de estruturas têxteis de tecidos ou malhas utilizando materiais com memória de forma na estrutura.

Segundo Caldas [123], a produção científica não tem o mesmo ritmo de trabalho em todas as áreas do conhecimento, porém em algumas circunstâncias, quando identificadas escassez de literatura na área de pesquisar, todas as referências encontradas são relevantes.

Ao final desta exaustiva pesquisa, percebeu-se que os materiais com memória de forma à base de ligas metálicas, principalmente o NiTi, apesar do elevado preço e de possuir um estreito leque de gradientes de temperatura de transformação, estas ligas com memória de forma ainda estão sendo largamente utilizadas em aplicações nas quais poderiam utilizar-se dos polímeros com memória de forma. Tal fenómeno ocorre principalmente nas áreas têxtil e do design, nas quais os polímeros com memória de forma são mais indicados, por apresentarem um vasto leque de temperaturas de transformação e baixo custo de produção, além de apresentarem excelentes propriedades de maleabilidade e flexibilidade, e baixa rigidez, que são parâmetros essenciais para uma boa tricotabilidade.

Também concluímos que no que se refere às pesquisas relacionadas à área têxtil utilizando materiais com memória de forma e, principalmente, aos compostos de Níquel-Titânio, têm sido direcionados em grande montante, à área do design, onde a aplicação dos materiais com memória de forma dá “vida” ao tecido a partir de determinado estímulo exterior ao meio onde se encontra envolvido. Assim sendo, o presente trabalho de doutoramento objetiva alargar as fronteiras do conhecimento acerca do comportamento das estruturas têxteis contendo materiais de memória de forma à base de Níquel-Titânio.

CAPÍTULO III - Estudo da tricotabilidade de fios de NiTi

3.1.Introdução

De um modo geral, fios metálicos não são comumente incorporados em estruturas têxteis que se destinam ao uso pessoal, embora ultimamente, fibras, fios, tecidos e outras estruturas fibrosas de valor agregado têm sido sucessivamente desenvolvidos especialmente para aplicações específicas, como fins técnicos e/ou para produtos de alto desempenho. Uma excelente visão geral sobre as tecnologias inteligentes para o design têxtil e engenharia, foi produzida por Tang e Stylios [124]. Os têxteis técnicos têm apresentado materiais alternativos para um ilimitado número de aplicações, incluindo a área médica, automóvel, aeroespacial, civil e mecânica, entre outras. Especialmente no tocante à área de vestuário, têm atraído muitíssimo interesse no design, bem como para vestuário desportivo e de proteção, a destacar, contra variações de temperatura [124].

De acordo com Fanguero [4], a tricotabilidade pode ser definida como a apetência de um fio para o processo de tricotagem, a qual é influenciada fundamentalmente pelas propriedades mecânicas deste, nomeadamente o atrito, a tração, a flexão e a elasticidade.

Diferentemente dos fios convencionais que apresentam a elasticidade natural das fibras, diminuindo os picos de tensão durante a tricotagem, os fios de alto desempenho, apresentam maiores resistência e rigidez quando comparados com estes, resultando em picos de tensão muito elevados durante a tricotagem. A tricotagem de fios metálicos, de vidro ou de fibra de carbono, é mais complexa devido a alguns fatores, tais como o comportamento elástico linear em tração, o baixo alongamento à rotura e o elevado grau de resistência à flexão. Durante a formação das laçadas, os fios são sujeitos a forças de flexão e tração que, por vezes, são aplicadas de forma combinada.

O atrito existente entre o fio e as diferentes partes do tear durante o processo, assumem um papel importante durante a tricotagem. Neste caso, os fios de elevado desempenho e rigidez apresentam comportamento mais complexo do que os fios convencionais, originando um alto coeficiente de atrito durante a passagem pelos elementos tricotadores (como guia-fios), que faz com que dificulte e, em certas circunstâncias, até impossibilite, o processo de tricotagem.

Metais com memória de forma são comumente utilizados para trabalhos permanentes em várias áreas de aplicações tais como stents [125], armações de óculos, termostatos para máquinas de

café, conectores elétricos, tubos de calor, grampos e esculturas, aparelhos médicos, aplicações têxteis no geral.

Os SMA's têm sido utilizados em tecidos, devido à sua aplicação funcional e estética. A processabilidade de SMA na área têxtil é dependente de uma série de fatores que devem ser conduzidos de uma forma positiva, entre as quais se destaca a flexibilidade do fio (necessário para ser tricotado) [83]. Os SMA's podem ser utilizados tanto na tecelagem quanto na malharia, tanto na sua forma original, ou como bi componentes, em conjunto com outro fio. Bons efeitos estéticos de memória de forma na indústria do vestuário têm sido produzidos através da aplicação de fios SMA's, os quais produzem efeitos de movimento no vestuário. No entanto, a incorporação de uma quantidade excessiva de fios metálicos na estrutura têxtil pode levar a um efeito prejudicial quanto ao toque e manuseio do tecido [91, 126]. Os principais desafios quanto à utilização dos SMA's nos processos de tecelagem ou malharia são gerados principalmente pela dureza e pouca extensibilidade do fio durante o processamento [91].

Neste capítulo são discutidas as propriedades dos fios de NiTi e a sua relação com o processo de tricotagem, na tentativa de apresentar algumas soluções para melhoria do seu processamento.

3.2. Características do fio Níquel-Titânio - NiTi

Levando em consideração os tipos de fios com memória de forma existentes no mercado, apesar de ainda existirem poucos fornecedores a nível mundial, foi escolhido por razões de reconhecimento da qualidade, o fio SmartFlex®, fabricado pela Saes Getters Group [127], com diâmetro de 127 μm , tratamento superficial oxidado, para realização do presente trabalho, conforme características descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características do fio SmartFlex®

Composição	NiTi (sendo 49,4 a 49,6 % de Níquel [128])
Secção transversal	cilíndrica
Diâmetro	127 μm
Superfície	Oxidado
Temperatura de transição	$A_s > 90^\circ \text{ C}$ $M_f > 65^\circ \text{ C}$

A Figura 22 apresenta as fases de transformação, onde se mostra o efeito de histerese no fio onde, através do aquecimento, ocorre a transformação da fase Martensite (M) para Austenite (A), enquanto que no resfriamento, ocorre a transformação no fio da fase Austenite (A) para Martensite (M).

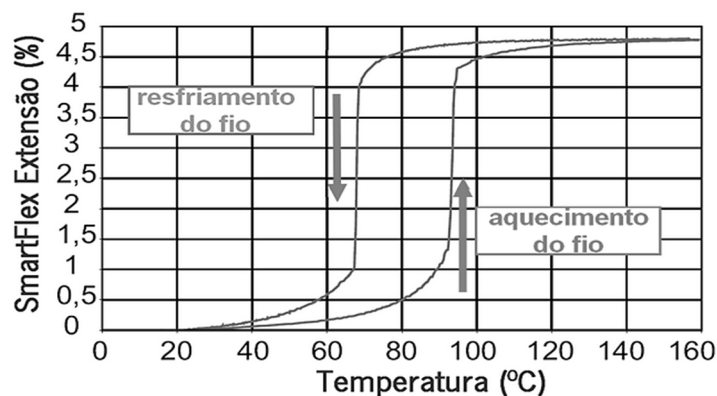


Figura 22 - Histerese do fio SmartFlex (Adaptado de [127])

3.3. Propriedades de atrito

De acordo com Fanguero [4], as forças de atrito que ocorrem durante o processamento têxtil, são geradas pelo contato dos fios e das fibras entre si e/ou pelo contato destas com as peças dos equipamentos onde se efetuam tais processamentos. O conhecimento do coeficiente de atrito entre as fibras e diferentes materiais assume particular importância no projeto e produção de estruturas de malha, principalmente devido à forma como estas são produzidas, e posteriormente, devido à forma como estas respondem à aplicação de cargas. Esta importância é igualmente demonstrada na prática pelas enormes argolas de histerese apresentadas na aplicação de cargas cíclicas

O atrito existente entre fios metálicos e as diversas partes do tear afeta principalmente o processo de tricotagem, onde um coeficiente de atrito elevado entre os fios metálicos e as agulhas/guia-fios de aço ou porcelana, implica a geração de forças elevadas durante este processo [4].

É de fundamental importância o conhecimento do coeficiente de atrito entre os fios e fibras entre si bem como com as partes da máquina para que se possa determinar a processabilidade destes materiais. Os fios metálicos de NiTi, por possuírem, de um modo geral, baixa elasticidade e elevada resistência à flexão, quando comparados aos fios têxteis convencionais, necessitam de estudo acerca do coeficiente de atrito sobre os diversos componentes da máquina, compostos de tensores, guia-fios e agulhas de aço ou porcelana, para que se possa determinar a processabilidade deste material.

A fim de analisar as propriedades de atrito dos fios de NiTi, e a partir destas a sua tricotabilidade, consideraram-se relevantes os seguintes aspectos:

- ✓ Coeficiente de atrito entre os fios de NiTi e aço;
- ✓ Coeficiente de atrito entre os fios de NiTi e cerâmica.

3.3.1. Método de ensaio para determinação do coeficiente de atrito dos fios de NiTi

Foram realizadas tentativas de analisar o atrito gerado entre o fio de NiTi em aço e em cerâmica, utilizando os equipamentos de medição de atrito normalmente utilizadas para fios têxteis, que se baseiam no aparelho inventado por Buckle e Pollitt [129]. Entretanto, este método mostrou incompatibilidade para a realização de ensaios de atrito de fios metálicos, notoriamente pela impossibilidade de controlo da velocidade do ensaio, e por outro lado pela rigidez do fio metálico, fazendo com que rebentasse durante o ensaio. Assim sendo, foi desenvolvido e construído no âmbito deste trabalho de doutoramento, um equipamento específico para medição do coeficiente de atrito por intermédio da utilização do dinamómetro.

O equipamento desenvolvido para realização de medições do coeficiente de atrito entre os fios de NiTi e os materiais sólidos (cerâmica e aço inox) foi confeccionado levando em conta descrições feitas por Blau [130], baseando-se na norma ASTM 3108, o qual abrange a medição do coeficiente de atrito cinético entre o fio e uma superfície sólida, ou superfícies de raio constante na zona de contato. Este método de teste é especialmente recomendado para ângulos de contato de π e 2π radianos (180° e 360°), bem como para fios que possuam coeficientes de atrito variando entre 0,1 e 0,5, conforme mostrado na Figura 23.

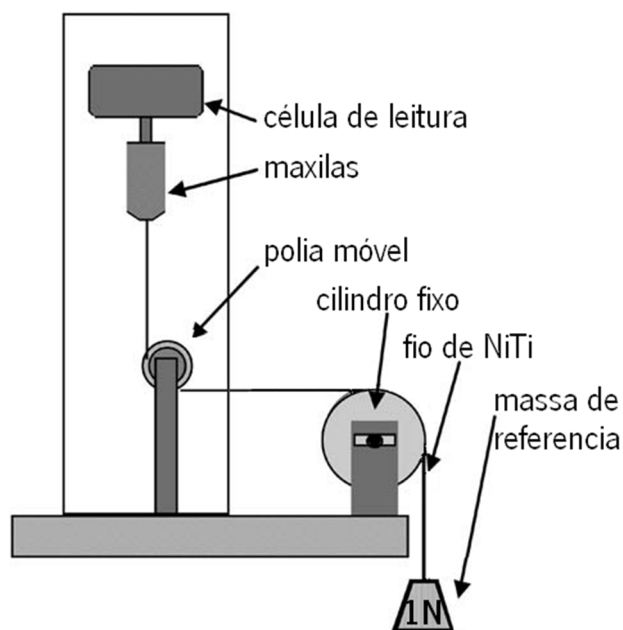


Figura 23 – Esquema de ensaio de atrito utilizando o dinamômetro (adaptado de [131])

3.3.1.1. Desenvolvimento do equipamento

O equipamento desenvolvido, conforme mostrado na Figura 24, consiste de um braço de 40 cm que se apoia na base do dinamômetro constituído por uma polia móvel que gira livremente, alinhado a 90° em relação ao eixo central do dinamômetro e um suporte cilíndrico removível que também forma um ângulo de 90° , o qual permite a colocação de materiais que possuam superfícies (aço inox ou cerâmica) na qual o fio deslize conforme mostrado em destaque na Figura 25.



Figura 24 – Dispositivo desenvolvido para realização de teste de atrito em fios

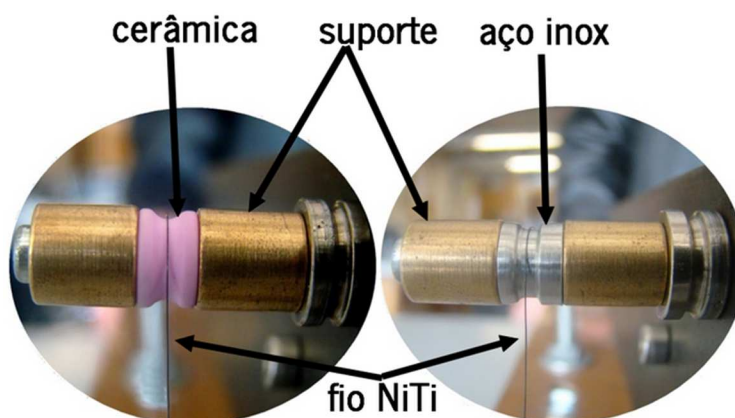


Figura 25 - Dispositivos com superfícies em cerâmica e inox para medição do coeficiente de atrito

De acordo com Blau [130], os ensaios para a determinação do atrito cinético, consistem no registo da carga necessária para a movimentação constante de um determinado peso, montado sobre uma superfície cilíndrica a 90° , e uma velocidade constante.

3.3.1.2. Ensaios e resultados

Para a realização dos ensaios, o sistema construído foi acoplado a um dinamómetro H100KS “Hounsfield Universal Testing Instrument”, e utilizado o fio de NiTi de $127\ \mu\text{m}$ a fim de medir o atrito cinético em superfície de aço inox e em cerâmica, conforme mostrado na Figura 26.

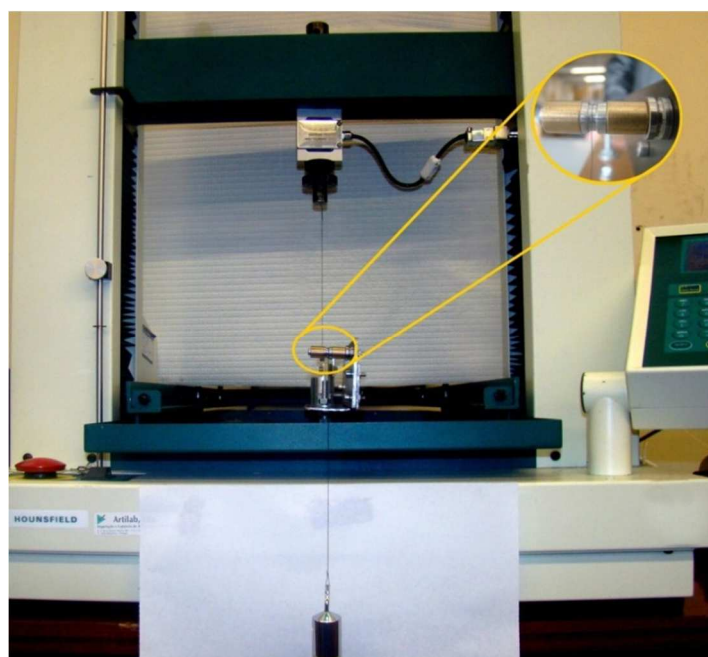


Figura 26 – Ensaio de atrito utilizando equipamento de ensaio de tração

Para realização dos ensaios, foram utilizados guia-fios semelhantes aos utilizados na máquina de tricotagem, compostos de peças cilíndricas de aço inox e de materiais cerâmicos nos quais o fio deslizava sobre a superfície. A velocidade de ensaio para ambas as amostras foi de 1000 mm/min, a uma temperatura de 22° C, correspondente a velocidade máxima permitida pelo dinamómetro. Todos os ensaios foram realizados utilizando 50 cm de fio e peso de 1N foi utilizado como base para ambos os ensaios. Segundo Blau [130], o coeficiente de atrito estático (μ_s) é determinado utilizando a Eq. 1.

$$\mu_s = \frac{\ln(T_2 / T_1)}{0,01745 \cdot \theta} \quad \text{Eq. 1 - Coeficiente de atrito estático}$$

Onde:

T_2 = força registada pela célula de carga (N);

T_1 = força de tensão (N);

θ = ângulo do cilindro (°).

Para validação do método de ensaio desenvolvido para a realização deste trabalho, foram realizados 5 ensaios, utilizando 3 tipos de fios têxteis diferentes a enumerar: algodão, poliéster e fibra de vidro, tendo sido avaliados os valores do coeficiente de atrito através do modelo desenvolvido, seguidamente foi feita a validação através do aparelho inventado por Buckle e Pollitt [129], largamente utilizado para realização de ensaios de atrito em fios, os quais apresentaram coeficientes de atrito praticamente semelhantes, conforme mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 - Comparação entre os valores de atrito obtidos por diferentes métodos

Tipo de fio	Massa linear	μ_s método Buckle e Pollitt	μ_s método desenvolvido
Algodão	73 tex	0,14	0,14
Poliéster	65 tex	0,13	0,14
Fibra de vidro	130 tex	0,19	0,20

Os resultados dos ensaios do coeficiente de atrito para fios de NiTi em contato com superfícies cerâmica e aço inox são apresentados na Figura 27.

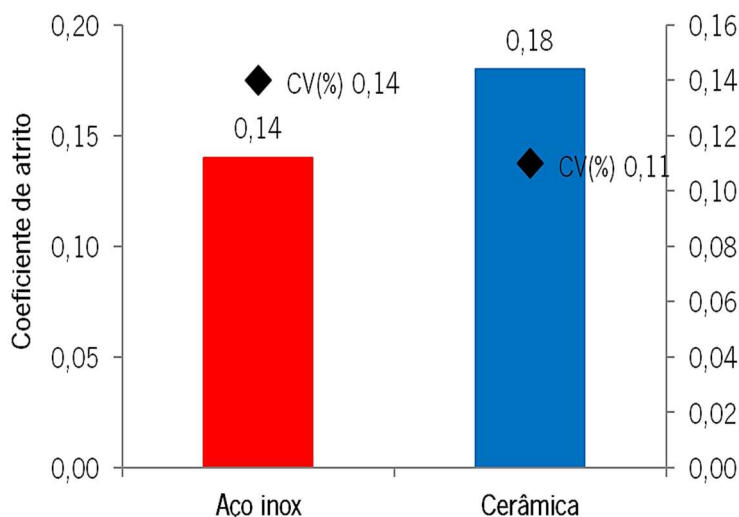


Figura 27 - Coeficiente de atrito para fios de NiTi 127 µm

3.3.2. Análise de resultados

Os valores de coeficiente de atrito cinético obtidos correspondentes a 0,14 para os fios de NiTi em contato com superfície de aço inox e 0,18 em superfícies cerâmicas, situam-se na mesma faixa de valores dos demais fios têxteis que apresentam boa tricotabilidade [132].

Podemos experimentalmente concluir que o aparelho desenvolvido por Buckle e Pollitt para medição de atrito em fios têxteis mostrou-se inadequado para medição de atrito no tipo de fio metálico que foi utilizado ao longo deste trabalho. Tal fenômeno está possivelmente atribuído à velocidade do cilindro enrolador que é em torno de 55 m/min., que acarreta muitas vibrações e instabilidade durante o ensaio. Por outro lado, possivelmente também, por se tratar de um fio que apresenta maior rigidez em comparação aos fios têxteis convencionais.

O aparelho desenvolvido no âmbito deste trabalho para a medição do atrito mostrou consistência nos ensaios, apresentando valores de atrito cinético semelhantes aos obtidos pelo método desenvolvido por Buckle e Pollitt para os fios de algodão, poliéster e fibra de vidro. Por outro lado, a velocidade máxima de ensaio foi de 1000 mm/min., muito inferior ao método anteriormente mencionado.

3.4. Propriedades de Flexão

Segundo Fangueiro [4], considerando um fio como uma barra de secção transversal circular, pode utilizar-se a Eq. 2, que relaciona a rigidez à flexão do fio, com o seu momento fletor e à sua curvatura à flexão, para calcularmos as propriedades de flexão do mesmo, que está diretamente associado ao seu diâmetro, ou seja, quanto maior for o diâmetro de um fio, maior será sua rigidez à flexão. Assim sendo, a flexão de um fio é, sobretudo, afetada pelo seu diâmetro.

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad \text{Eq. 2 - Equação para cálculo da flexão dos fios [4]}$$

Onde:

$1/r$ = curvatura do fio fletido (mm^{-1});

r = raio da curvatura (mm);

M = momento fletor que provoca a curvatura (N mm);

E = módulo de elasticidade (Young) (MPa);

I = momento de inércia da secção transversal do fio (mm^4);

EI = rigidez à flexão do fio (N mm^2).

3.4.1. Método de ensaio para determinação das propriedades de flexão dos fios de NiTi

A fim de avaliar a tricotabilidade dos fios de NiTi, também se verificou a necessidade de avaliar as propriedades de flexão destes fios de NiTi em comparação com as propriedades de flexão de fios de fibra acrílica – PAC, de massa linear 70 tex, os quais apresentam excelentes propriedades de tricotabilidade em máquinas de produção de malhas de trama.

Para realização dos ensaios, foram construídas 5 amostras de cada tipo de fio, tanto de NiTi, quanto de PAC, conforme mostradas na Figura 28, as quais foram ensaiadas no sistema KES

(*Kawabata Evaluating System*), módulo de ensaio à flexão [133] num total de 5 repetições para cada amostra. A Figura 29 apresenta o aparelho utilizado (KES-3 Bending) juntamente com uma imagem da curva de histerese obtida durante os ensaios.

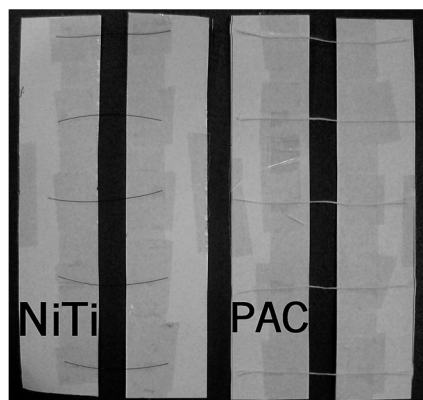


Figura 28 – Amostras a serem ensaiadas contendo fios de NiTi e de PAC

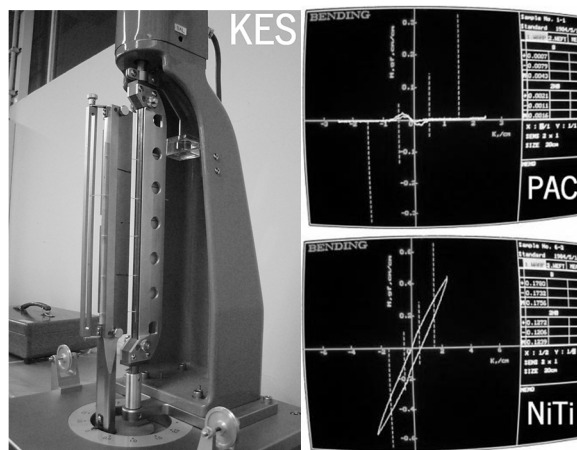


Figura 29 - Equipamento KES-3 Bending e curvas de histerese para PAC e NiTi

As amostras foram preparadas de acordo com as instruções do sistema KES e subsequentemente submetidas aos ciclos de flexão que forneceram valores referentes ao módulo de resistência à flexão (B) e à histerese à flexão (2HB). Segundo o manual do equipamento, utiliza-se da Eq. 3, para o cálculo do momento fletor (M) que corresponde a uma curvatura (K) de 1 cm^{-1} .

$$M = B \cdot K \pm HB \quad \text{Eq. 3 - Equação utilizada para cálculo do momento fletor}$$

Onde:

M = momento fletor (g cm);

B = módulo de resistência à flexão (g cm²);

K = curvatura (cm⁻¹);

HB = histerese à flexão (g cm).

3.4.2. Análise dos resultados

Os dados referentes aos resultados dos ensaios foram tratados estatisticamente, utilizando o software Office Excel®, sendo mostrados no Quadro 3.

Quadro 3 - Resultados dos ensaios de flexão sobre amostras com 5 fios cada em curvatura de 1 cm

Valores	Fios de NiTi (127 µm)			Fios de PAC (70 tex)		
	Momento fletor	Módulo de resistência à flexão	Histerese à flexão	Momento fletor	Módulo de resistência à flexão	Histerese à flexão
	M (g.cm)	B (g.cm ²)	HB (g.cm)	M (g.cm)	B (g.cm ²)	HB (g.cm)
Mínimo	0,3198	0,1732	0,1342	0,0059	0,0028	0,0016
Máximo	0,3295	0,1853	0,1445	0,0068	0,0079	0,0021
Média	0,3196	0,1808	0,1406	0,0062	0,0042	0,0018
CV(%)	3,68	1,65	6,60	6,35	6,61	12,67

De acordo com os resultados obtidos para os dois tipos de fios testados, os fios de NiTi mostraram valores de módulo de resistência à flexão, bem como histerese à flexão muito elevados quando comparados com fios de PAC estudados que possuem diâmetro de aproximadamente 300 µm [134]. Por outro lado, comparando os valores com aqueles obtidos por Figueiro [4] para fios de fibra de vidro e fibra de vidro e aço, com massas lineares de 136 tex e 272 tex, respectivamente. Os fios de NiTi apresentaram ainda, valores muitíssimo

superiores em ambos os parâmetros estudados, demonstrando altíssimas resistência e histerese à flexão, para este tipo de material. Quanto mais resistente à flexão for o fio, maior será a dificuldade em ser fletido pelos elementos tricotadores para que seja possível formar laçadas, ocasionando à ruptura tanto por parte do fio, quanto possivelmente das agulhas durante o processo de tricotagem.

Os ensaios para os diferentes tipos de fios estudados, conforme mostrado no Quadro 3, mostraram baixo coeficiente de variação para ambos os conjuntos estudados. Entretanto, os conjuntos de fios de NiTi mostraram um coeficiente de variação (6,60%) muito inferior aos fios de PAC (12,67%), tal facto possivelmente atribui-se por ser um fio metálico, enquanto que o PAC possui menores compactação e acabamento superficial.

3.5. Propriedades de Tração

De acordo com Fangueiro [4], a eficiência do processo de tricotagem depende da tricotabilidade dos fios, o qual é diretamente influenciado pelas propriedades mecânicas do fio, tais como atrito, flexão e elasticidade.

A produção de malhas de trama a partir de fios metálicos e fios de alto desempenho, tais como NiTi, fibras de carbono e de vidro, que possuem propriedades mecânicas com valores muito superiores aos fios convencionais, tornando-os mais resistentes e rígidos, resulta em picos de tensão muito elevados durante o processo de tricotagem, especialmente quando a tricotagem é intermitente, como é o caso da produção de malhas com forma em teares retos eletrónicos.

Um conjunto de testes foi planeado a fim de conhecer o comportamento em tração para fios de NiTi e PAC e ao mesmo tempo fazer uma comparação entre eles no que tange à zona elástica, que está diretamente relacionada à capacidade de suportar os picos de tensão ocasionados durante o processo mecânico de tricotagem.

3.5.1. Método de ensaio para determinação das propriedades de tração dos fios de NiTi

Os ensaios de tração dos fios de NiTi e PAC foram realizados, com base na norma ISO 1462, utilizando o dinamômetro H100KS “*Hounsfield Universal Testing Instrument*”. Foi definido o comprimento inicial entre as maxilas de 100 mm e velocidade de ensaio de 100 mm/min. Foram realizados 5 testes para cada tipo de fio, a fim de obter melhor consistência nos resultados.

Para realização dos ensaios, foram preparadas 10 amostras sendo 5 contendo fios de NiTi, de 127 μm de diâmetro e 5 contendo fios de PAC de 70 tex de massa linear.

Todos os testes foram realizados até o ponto de ruptura do fio, tendo sido gravados os dados referentes à tensão e extensão ao longo dos ensaios. Os dados foram tratados e o resumo comparativo acerca do comportamento mecânico dos dois diferentes tipos de fios são mostrados no Quadro 4 e na Figura 30.

Quadro 4 – Propriedades mecânicas dos fios estudados

Tipo de fio	Extensão à ruptura (%)	Resistência à ruptura (N)	Tenacidade (cN.tex^{-1})
PAC	27	6,4	9,2
NiTi	6	22	19,5

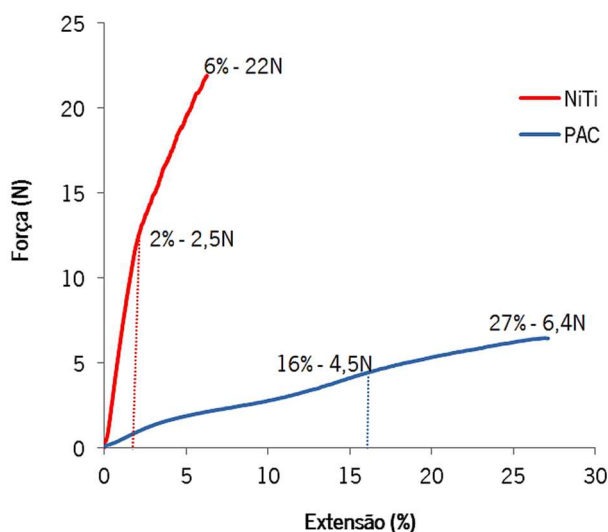


Figura 30 - Curvas carga-extensão para os fios de NiTi e PAC

3.5.2. Análise de resultados

Analisando os resultados obtidos, o fio de NiTi estudado apresentou um módulo de tenacidade muito mais elevado (2x), quando comparado com os fios de PAC que apresentam excelentes propriedades de tricotabilidade. Tal comportamento do fio de NiTi, associado à baixa elasticidade do fio (2%), leva a menor capacidade para absorver as normais flutuações de tensão do processo de tricotagem.

Segundo Fangueiro [4], a diminuição dos picos de tensão na tricotagem de fios convencionais, é atribuída à elasticidade natural que estas fibras possuem. Por outro lado, quando se utiliza fios que possuem comportamento elástico linear, além de baixo alongamento à rotura e elevado grau de resistência à flexão, como é o caso de fios de NiTi, fibras de carbono e de vidro, torna-se muito mais delicado e complexo a processabilidade no tear, sendo necessários ajustes na máquina, além de uma diminuição na velocidade de processamento.

Como pode se observar, o fio de NiTi possui baixa elasticidade (2%) em comparação com o fio de PAC (16%). Por outro lado, possui praticamente 4 vezes a resistência à rotura do fio de PAC, propriedades que tornam muito mais complexo a utilização deste tipo de fio por parte dos elementos tricotadores do tear, que aplicam constantemente picos de tensão sobre o fio a ser tricotado.

3.6. Conclusões

Com base nos estudos a cerca do atrito, flexão e resistência dos fios de NiTi e PAC, propriedades que estão diretamente ligadas à capacidade de tricotabilidade dos fios em equipamentos têxteis convencionais, os ensaios mostraram as seguintes conclusões:

- O método desenvolvido no âmbito deste trabalho de doutoramento, baseado no esquema apresentado por Blau [130], mostrou eficácia para ensaios de avaliação do atrito em fios em situações que impossibilitem a utilização do método desenvolvido por Buckle e Pollitt [129].
- Os fios de NiTi apresentaram um coeficiente de atrito tanto em superfícies cerâmicas (0,18) quanto em aço inox (0,14), na mesma faixa dos demais fios têxteis que oferecem boa tricotabilidade [132].
- O resultado dos ensaios de flexão realizados para os fios de NiTi mostraram valores de módulo de resistência à flexão, bem como histerese à flexão muito elevados quando comparados com fios de PAC. Por outro lado, comparando os valores de resistência à flexão e histerese à flexão com aqueles obtidos por Fangueiro [4] para fios de fibra de vidro e fibra de vidro e aço, com massas lineares de 136 tex e 272 tex respectivamente, apresentaram ainda, valores muito superiores, resultados que conduzem a concluir que os fios de NiTi não apresentam boas propriedades de tricotabilidade no tocante às propriedades de flexão, porque quanto maior resistência à flexão e histerese à flexão o fio possuir, conseqüentemente apresentará maior dificuldade em ser fletido pelos elementos tricotadores durante a formação das laçadas, ocasionando à ruptura tanto por parte do fio, quanto possivelmente das agulhas durante o processo de tricotagem.
- Relativamente aos ensaios de tração com fios de NiTi e PAC, estes evidenciaram a rigidez estrutural do fio metálico de NiTi demonstrada por uma alta resistência à tração e um baixo alongamento à rotura, quando comparado com o fio de PAC, que apresenta baixa resistência à rotura, entretanto uma notável zona elástica, capaz de suportar aos picos de tensão durante a tricotagem.

CAPÍTULO IV - Análise da absorção de energia de fios de NiTi

4.1. Introdução

A energia disponível nos materiais com memória de forma varia de acordo com o seu diâmetro, com a sua composição e, no caso dos fios de NiTi, de acordo com o percentual de Níquel (Ni) na sua composição. Este capítulo objetiva estudar a energia disponível em fios de NiTi com três diâmetros diferentes, 50 μm , 127 μm e 210 μm , deformados em três diferentes tipos de laçadas, normal, carregada e flutuante. Desta forma, pretende-se definir qual a melhor combinação diâmetro de fio/tipo de laçada no que diz respeito à energia disponível para mover a estrutura têxtil, que será importante para os trabalhos futuros desta pesquisa de doutoramento.

4.2. Materiais e métodos

4.2.1. Materiais

Para realização das experiências, foram utilizados fios de níquel-titânio, não memorizados, com três diâmetros diferentes: 50 μm , 127 μm e 210 μm , fabricados pela empresa SAES Getters Group [127]. As propriedades dos fios utilizados são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Propriedades dos fios de NiTi

Temperatura de transformação	
Varição da temperatura de transformação	-200 - +110° C
Entalpia de transformação	0,47 - 0,62 kJ/Kg K
Tensão de transformação (%)	
Acima de 1 ciclo	Acima de 8%
Acima de 100 ciclos	Acima de 5%
Acima de 100.000 ciclos	Acima de 3%
Abaixo de 100.000 ciclos	$\pm 2\%$
Histerese térmica	30 - 80° C

Propriedades Físicas	
Ponto de fusão	± 1310° C
Densidade	6,45 kg/dm ³
Condutividade térmica Martensite	± 9 W/m K
Condutividade térmica Austenite	± 18 W/m K
Resistividade elétrica	50 - 110 μΩcm
Propriedades de corrosão e biocompatibilidade	excelente
Permeabilidade magnética	<1,002
Susceptibilidade magnética	3,0 x 10 ⁶
Propriedades Mecânicas	
Módulo de Young - Austenite	± 70 - 80 GPa
Módulo de Young - Martensite	± 23 - 41 GPa
Resistência à tração (temperatura ambiente)	Acima de 1.900 MPa
Resistência à tração (100°C)	± 900 MPa
Fator de contração transversal	0,33
Tensão elástica (fio memorizado – <i>fully annealed</i>)	20 - 60%
Tensão elástica (fio não memorizado – <i>cold worked</i>)	5 - 20%
Maleabilidade a quente	razoável
Maleabilidade a frio	Difícil (rígido)
Maquinabilidade	Muito pobre

Adaptado de: Selected Properties of NiTi-based Alloys. INFO - SHEET No. 4. Memory-Metalle GmbH [135]

Foram confeccionadas um conjunto de amostras, utilizando um tear retilíneo manual com 8 agulhas/polegada, produzidas em três tipos de laçadas diferentes: normal, flutuante e carregada, conforme Quadro 6.

Quadro 6 - Parâmetros estruturais das amostras

Parâmetros	Laçada flutuante			Laçada normal			Laçada carregada		
Diâmetro fio NiTi (μm)	50	127	210	50	127	210	50	127	210
Comprimento da laçada (mm)	3,7	4,9	4,2	4,9	6,7	6,1	5,4	7,2	6,9
Altura da laçada (mm)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Largura da laçada (mm)	3	3	3	2	2	2	2,2	2,2	2,2

Foram utilizados fios de fibra acrílica de 70 tex como base para a formação das laçadas com os fios de NiTi nas amostras.

A estrutura com laçada normal (Figura 31a), foi produzida usando laçada normal como estrutura de base, bem como para a passagem do fio de NiTi. Entretanto, a estrutura com laçada carregada (Figura 31b), foi produzida alternando laçada normal com laçada carregada nas agulhas adjacentes da mesma fileira, enquanto que a estrutura de laçada flutuante (Figura 31c), foi produzida alternando laçada normal com laçada flutuante nas agulhas adjacentes da mesma fileira.

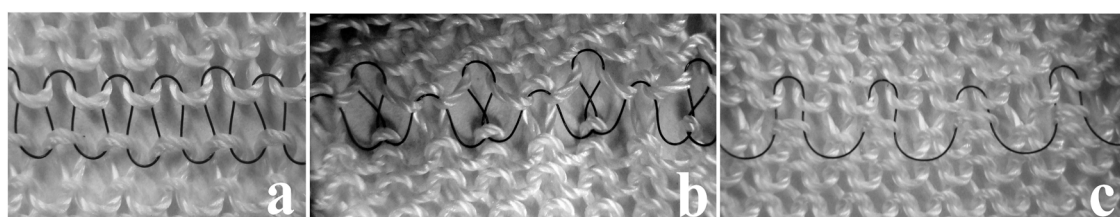


Figura 31 - Estruturas de malha mostrando laçada normal (a), laçada carregada (b) e laçada flutuante (c)

Após a produção das malhas, as fileiras contendo os fios de NiTi foram removidas de cada amostra, tal como mostrado na Figura 32.



Figura 32 - Laçadas produzidas com fios de NiTi

As amostras de fios de NiTi, foram então aquecidas em mufla a 550°C, durante 30 minutos [136], para que os fios fossem memorizados na forma das laçadas adquiridas conforme mostrados na Figura 32.

4.2.2. Método experimental

Após o processo de produção das amostras e respectiva memorização em forma de laçadas normal, flutuante e carregada, foram analisadas afim que fossem calculadas a energia de deformação, para os diferentes tipos de laçada e de diâmetros selecionados.

Os ensaios foram realizados com base na norma ISO 1462, utilizando um dinamómetro H100KS “*Hounsfield Universal Testing Instrument*”, equipado com uma câmara térmica com controlo da temperatura, mostrado na Figura 33. Foi utilizada uma distância inicial entre as maxilas de 100 mm e velocidade de ensaio de 10 mm/min. Os ensaios foram realizados para cada tipo de laçada/diâmetro correspondente, a fim de calcular a influência do tipo de laçada sob o desempenho do fio na estrutura de malha, em termos de absorção de energia em temperatura de transformação martensítica do material.



Figura 33 - dinamómetro H100KS “*Hounsfield Universal Testing Instrument*”, equipado com câmara térmica com controlo da temperatura

Todos os ensaios foram realizados até o momento em que a estrutura memorizada em forma de laçada, fosse deformada, ou seja, quando o fio se encontrava na fase de deformação elástica do material, não sendo necessário conduzir o ensaio até à ruptura para atingir o objetivo do presente estudo, conforme mostrado na Figura 34.

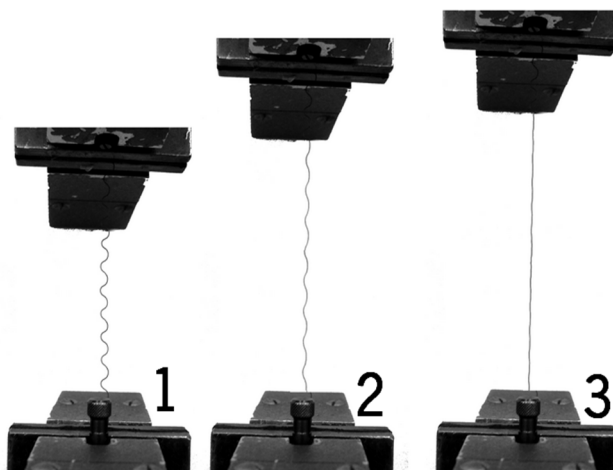


Figura 34 - Método de teste: posição inicial (1), deformação média (2) e linearidade do fio (3)

Após a coleta dos dados relativos aos ensaios, os valores foram tratados, utilizando o software OriginPro[®] 8.

4.3. Análise dos resultados

4.3.1. Influência do diâmetro dos fios

As curvas tensão/deformação obtidas apresentam um comportamento típico de tração dos fios em forma das diferentes laçadas estudadas. Este comportamento pode ser dividido em zonas diferentes, conforme demonstrado na Figura 35, onde:

- zona 1 corresponde à deformação estrutural inicial das laçadas, que é caracterizada por uma baixa rigidez, tendendo a deformações elevadas para baixas cargas aplicadas;
- zona 2 corresponde à deformação estrutural das laçadas na qual o fio se encontra memorizado, até atingir uma linearidade do fio, correspondendo ao ponto de bloqueamento da estrutura;
- zona 3, indicando o início da deformação elástica do fio de NiTi. Ou seja, as zonas 1 e 2 correspondem a deformação estrutural, enquanto que a zona 3 corresponde a deformação elástica do material.

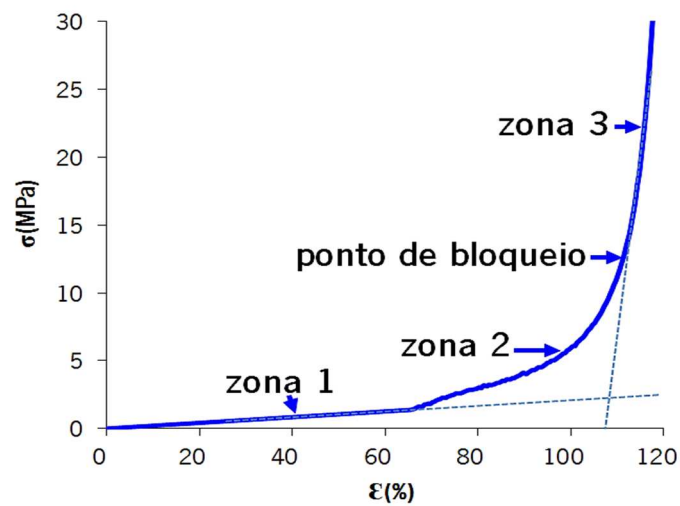


Figura 35 - Curva típica de tensão/deformação obtida para fios de NiTi na forma de laçada

As curvas tensão/deformação obtidas para os fios de NiTi em laçadas flutuante, normal e carregada são mostradas na Figura 36, respectivamente.

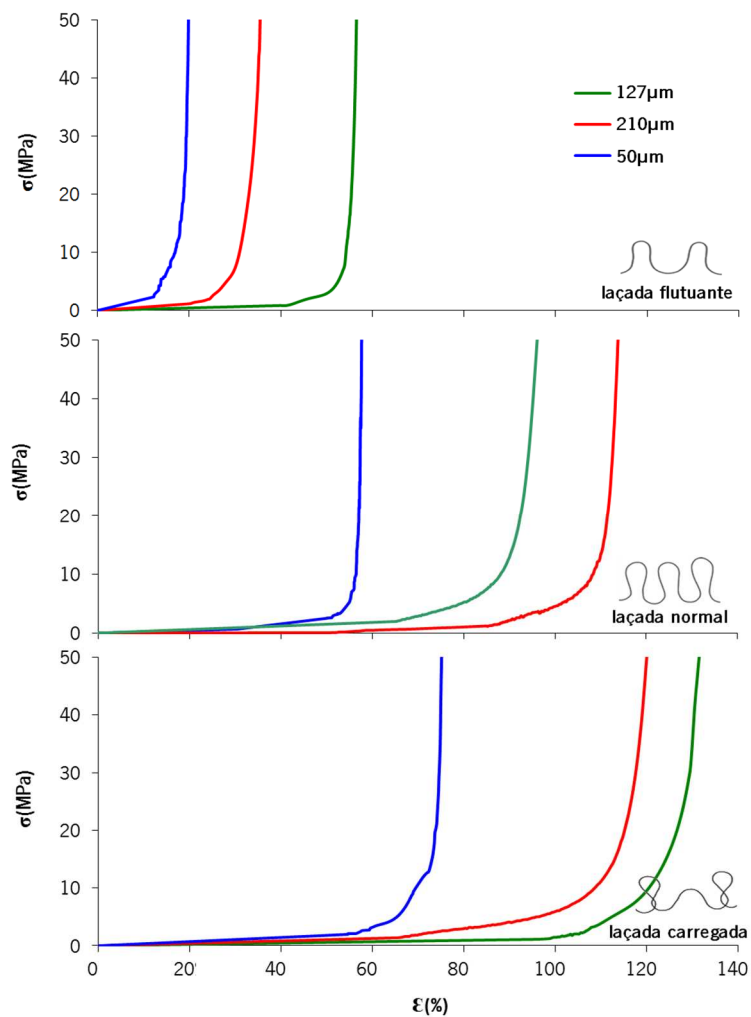


Figura 36 - Curva tensão/deformação dos fios de NiTi

Como demonstrado nas figuras acima, o diâmetro do fio de NiTi influencia fortemente o comportamento das laçadas na primeira parte da zona de deformação, tanto que a deformação aumentou até o ponto de bloqueio, variando de acordo com o tipo de laçada. O resumo dos valores obtidos para os diferentes tipos de laçadas e diâmetros são mostrados no Quadro 7.

A energia acumulada pelo material variou diferentemente conforme o tipo de laçada na qual o fio de NiTi foi programado, bem como com a variação no diâmetro do fio.

Entende-se como o ponto de bloqueio, o ponto correspondente ao final da zona 2, onde finaliza a deformação estrutural do fio e se inicia a zona 3, correspondente à deformação elástica do material. Para efeito deste estudo, este ponto foi calculado de acordo como descrito por Araújo [9], traçando uma linha reta sobre a curva correspondente à deformação elástica do material, à medida que a curva deixa a reta, este ponto é entendido como o ponto de bloqueio, conforme mostrado na Figura 35.

Quadro 7 – Ponto de bloqueio para diferentes tipos de laçadas e diâmetros

Parâmetros		Laçada flutuante			Laçada normal			Laçada carregada		
Diâmetro do fio NiTi (μm)		50	127	210	50	127	210	50	127	210
Ponto de bloqueio	$\sigma(\text{MPa})$	19	19	24	12	21	21	14	26	36
	$\varepsilon(\%)$	19	55	34	57	112	93	73	128	120

De acordo com os valores obtidos, verificou-se que a laçada carregada é a forma que necessita de maior carga para originar a deformação estrutural do fio. Foi evidenciado nos ensaios de deformação estrutural, que o fio de 127 μm possui um maior alongamento e considerável energia disponível no ponto de bloqueio, enquanto que o de 210 μm possui uma maior resistência, mas por outro lado, possui menor alongamento. Tal fenómeno, de acordo com estudo de DesRoches e Dolce [137, 138], possivelmente está associado à rigidez dos fios, o qual aumenta de acordo com o aumento no diâmetro dos mesmos [139]. Por outro lado, os fios de 50 μm apresentaram valores, tanto de alongamento quanto de força, bastante inferiores aos mencionados anteriormente, estando, este facto, associado à baixa rigidez do material quando comparado com os demais ensaiados.

4.3.2. Influência do tipo de laçada

Para analisar o comportamento dos fios de NiTi em diferentes tipos de laçadas, foram realizadas experiências nas quais se utilizou o mesmo tipo de fio, deformado em laçadas normal, flutuante e carregadas. As curvas de tensão/deformação dos ensaios realizados são mostradas na Figura 37 a, b e c, respectivamente.

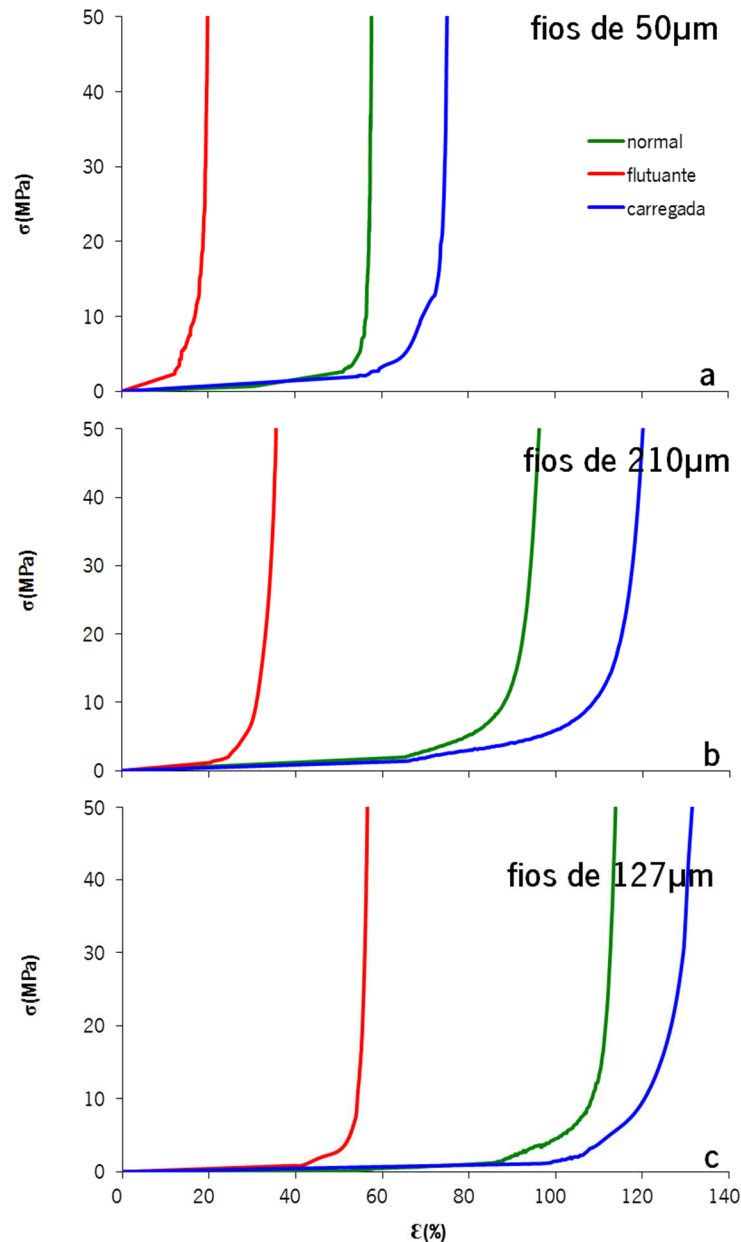


Figura 37 - Curva tensão/deformação para fios de NiTi em diferentes tipos de laçadas e diâmetros: 50 μ m (a); 210 μ m (b); 127 μ m (c)

Os ensaios de aplicação de carga realizados nos fios de NiTi de mesmo diâmetro, variando o tipo de laçada, evidenciaram que o tipo de laçada na qual o fio foi memorizado tem grande influência sobre o comportamento do mesmo e é dependente do alinhamento do fio sobre a carga axial que é aplicada.

Foi observado para todas as curvas, independentemente da forma de laçada nas quais os fios de NiTi encontravam-se memorizados, que ocorreu um aumento gradual da força à medida que o fio foi deformado durante os ensaios. Este comportamento está associado à zona 1, correspondente ao início da deformação estrutural das laçadas nas quais os fios encontravam-se deformados.

As curvas mostraram para ambos os ensaios, uma clara mudança da zona 2 para a zona 3, ou seja, ao final da deformação da estrutura em forma de laçada em que os fios estavam deformados, houve um incremento quase que exponencial da força necessária para a continuação do ensaio, bem como as curvas tornaram-se praticamente lineares, mostrando o ponto de bloqueio, correspondente ao final da zona 2 e início da zona 3, correspondente à deformação elástica do material.

Para ambas as laçadas estudadas, a laçada flutuante, conforme mostrada na Figura 37, apresentou baixos valores de deformação da estrutura para ambos os tipos de fios, enquanto que a laçada carregada foi a que apresentou maior força no ponto de bloqueio da estrutura, bem como maior relação de extensão sobre o comprimento inicial das amostras.

4.3.3. Energia

A energia disponível para os fios de NiTi, variando os tipos de laçadas e diâmetros, pode ser calculada a partir da área abaixo da curva de tensão/deformação, tomada até o início da deformação elástica do fio, ou seja, até o ponto de bloqueio [9], correspondentes às zonas 1 e 2 conforme mostrado na Figura 38, para os fios de NiTi de 210 µm de diâmetro variando a forma da laçada na qual o fio programado. Os valores foram calculados por intermédio do software OriginPro® 8. O Quadro 8 mostra o resumo comparativo acerca da energia disponível para os diferentes tipos de fios de NiTi sob diferentes tipos de laçadas.

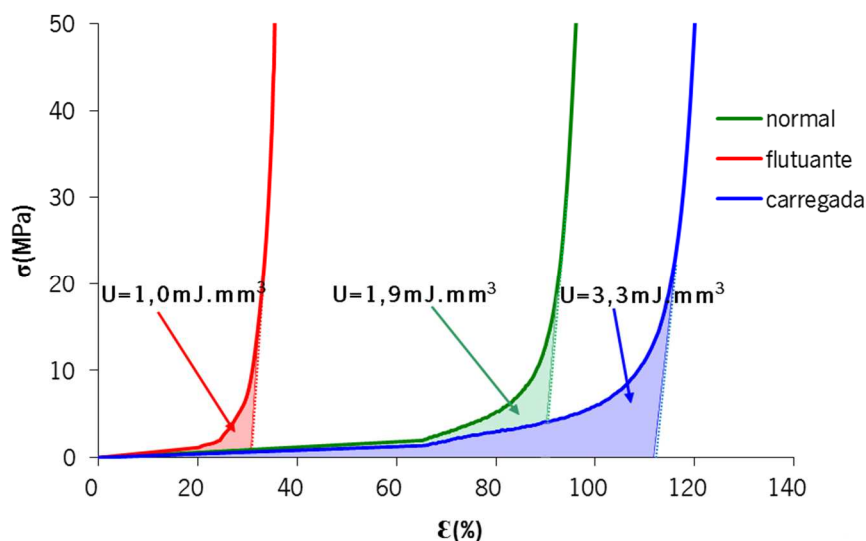


Figura 38 - Energia de deformação do fio de NiTi de 210 μm sobre diferentes tipos de laçadas

Quadro 8 - Energia disponível dos fios de NiTi

Parâmetros		Diâmetros dos fios de NiTi		
		50 μm	127 μm	210 μm
Tipo de laçada	Flutuante	0,7mJ.mm ³	0,8mJ.mm ³	1,0mJ.mm ³
	Normal	0,7mJ.mm ³	1,6mJ.mm ³	1,9mJ.mm ³
	Carregada	1,6mJ.mm ³	2,7mJ.mm ³	3,3mJ.mm ³

Os resultados dos ensaios mostraram que os fios de NiTi possuem energia disponível para mudar de forma, quando atingem a temperatura de transformação martensítica. A energia disponível aumenta com o aumento do diâmetro do fio. Por outro lado, também houve uma variação na energia, de acordo com a forma da laçada na qual o fio de NiTi foi programado. Os fios programados em forma de laçada carregada apresentaram maior resistência à deformação estrutural, quando comparado com os demais fios estudados. Por outro lado, os programados em forma de laçada flutuante mostraram possuir baixa energia disponível para realização de trabalho.

Na análise acerca da correlação sobre o comportamento dos diferentes tipos de fios quanto à variação do diâmetro e das laçadas, conforme mostrado na Figura 39, ficou evidenciado que a existe uma forte correlação entre a energia e o diâmetro dos fios. Também foi evidenciado que,

na laçada flutuante, não houve uma variação expressiva entre os fios de diâmetros diferentes, por outro lado, na laçada carregada, há um aumento na energia do fio à medida que aumentou o diâmetro.

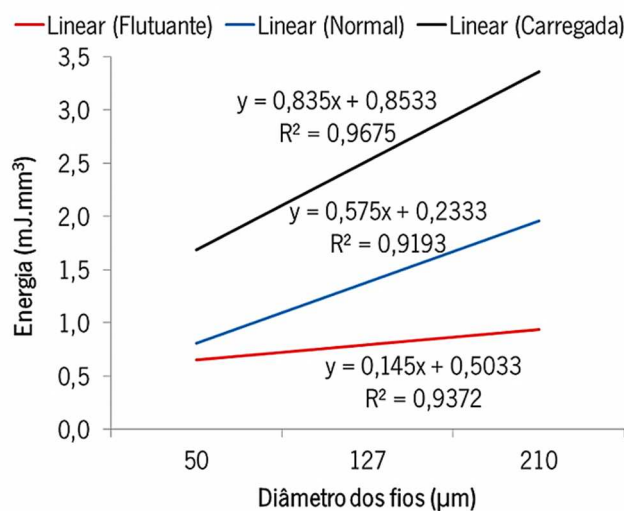


Figura 39 – Correlação entre a energia dos fios de NiTi e os tipos de laçadas e diâmetros

4.4. Conclusões

Após o estudo sobre os fios de NiTi de diâmetros diferentes, memorizados sob a forma de laçadas (normal, flutuante e carregada) podem apontar-se as seguintes conclusões:

- O fio de NiTi de 50 μm de diâmetro possui baixa energia disponível para realização de trabalho, especialmente quando incorporado com outros materiais em estruturas têxteis. Também durante o processo de produção das amostras, foi constatada fragilidade neste fio quanto a suportar os picos de tensão durante o processo de formação das laçadas fazendo com que o mesmo rompesse inúmeras vezes.
- O fio de NiTi de 210 μm , à medida que varia a forma da laçada, também varia consideravelmente a energia disponível. Os memorizados em forma de laçada carregada mostraram possuir considerável energia disponível para movimentação de estruturas. Entretanto, foi constatado durante a produção das amostras, que este fio de NiTi é bastante rígido para a tricotabilidade em máquinas convencionais, fenômeno já evidenciado em estudos realizados por Winchester e Stylios [91] que centrou-se na gama de técnicas e processos utilizados para acomodar as características e exigências específicas das ligas com memória de forma, ao estudar a processabilidade de fios de SMA de diâmetros diferentes, os quais concluíram que o limite mais apropriado está entre 100 e 200 μm de diâmetro. Estudos realizados ao cabo deste projeto de doutoramento também nos levaram a concluir que o fio de 210 μm de diâmetro apresenta alta rigidez, baixa flexibilidade, tornando-o praticamente impossível de ser tricotado pelas máquinas convencionais.
- O fio de NiTi de 127 μm , apesar de possuir menor energia disponível quando em comparação ao fio de 210 μm , apresentou boa capacidade de tricotabilidade, bem como mostrou dispor de energia disponível, principalmente quando memorizado em forma de laçada carregada.
- Os resultados dos ensaios mostraram existir uma forte correlação entre o diâmetro dos fios e a forma das laçadas, no tocante à energia disponível, mostrando que para ambas as formas, a energia aumentou à medida que aumentou o diâmetro destes,

especialmente evidenciado para os fios que foram memorizados em forma de laçada carregada.

Finalmente, os resultados obtidos neste capítulo apresentam-se como uma contribuição importante para o desenvolvimento de estruturas de malha com memória de forma que farão parte do trabalho subsequente. Por outro lado, levando em consideração a processabilidade dos fios de SMA quando da elaboração das amostras, bem como o resultado obtidos neste capítulo, conclui-se que o fio NiTi de 127 μm de diâmetro é o mais adequado para a persecução dos estudos em estruturas de malha.

CAPÍTULO V - Análise do
comportamento de fios com
memória de forma e
elastómeros

5.1. Introdução

Este capítulo apresenta o estudo do comportamento de fios com memória de forma, nomeadamente NiTi, em combinação com fios elastoméricos.

Uma das principais propriedades dos fios de NiTi é que quando expostos à temperatura de transição martensítica, tendem a mudar a sua forma para uma forma pré programada, enquanto que uma das suas principais propriedades dos fios elastoméricos é possuir uma excelente elasticidade.

Este capítulo estuda o comportamento de fios de NiTi deformados em diferentes tipos de laçadas, trabalhando em conjunto com fios elastoméricos de diferentes massas lineares, afim de encontrar uma melhor combinação acerca do comportamento mecânico entre estes tipos de fios.

Quando expostos à temperatura, os fios de NiTi deformados em diferentes tipos de laçadas, tendem a adquirir a forma linear, previamente memorizada. Por outro lado, sofrem ação contrária, ocasionada pela tensão fornecida pelo fio de elastano. Assim sendo, este capítulo objetiva estudar a combinação de fios elastoméricos com diferentes massas lineares, a fim de determinar qual a melhor combinação NiTi – elastano, auxiliando ao desenvolvimento de estruturas dinâmicas capazes de adquirir formas distintas, quando na presença de calor e à temperatura ambiente.

5.2. Planeamento das experiências

Para a realização do presente estudo, foi necessária a preparação de um conjunto de amostras contendo fios de NiTi com 127 μm de diâmetro, juntamente com fios de elastano de massas lineares de 285, 420 e 620 dtex, ensaiados conjuntamente à tração, variando os seguintes fatores:

- número de fios de elastano;
- massa linear dos fios de elastano;

- temperatura (ambiente e temperatura de transformação martensítica do NiTi);
- tipos de laçadas (normal, carregada e flutuante) dos fios de NiTi.

Para a realização das experiências, foi necessária a preparação de diversas amostras com fios de NiTi, com programação em forma linear, e elastano, para serem ensaiadas à temperatura de 21° C e de 85° C (temperatura de transição martensítica do NiTi). Após a definição dos parâmetros de estudo, procedeu-se à elaboração de uma codificação das amostras a ensaiar, de forma a facilitar o entendimento dos resultados obtidos. Os parâmetros de estudo neste capítulo, assim como a tipologia das amostras preparadas, são apresentados no Quadro 9 e no Quadro 10, respectivamente.

Quadro 9 - Tipologia das amostras contendo apenas fios de NiTi como base

Temperatura de ensaio	Tipo de laçada (NiTi)	Código
21° C	Normal	21_NiTi_N
	Carregada	21_NiTi_C
	Flutuante	21_NiTi_F
85° C	Normal	85_NiTi_N
	Carregada	85_NiTi_C
	Flutuante	85_NiTi_F

Quadro 10 - Combinação das amostras contendo fios de NiTi e elastano para testes a 21 e a 85° C

Tipo de laçada (NiTi)	Massa linear do Elastano (dtex)	Número de fios de elastano	Código da amostra para ensaio a 21° C	Código da amostra para ensaio a 85° C
Normal	285	1	21_N285_1EA	85_N285_1EA
		2	21_N285_2EA	85_N285_2EA
		4	21_N285_4EA	85_N285_4EA
	420	1	21_N420_1EA	85_N420_1EA
		2	21_N420_2EA	85_N420_2EA
		4	21_N420_4EA	85_N420_4EA
	620	1	21_N620_1EA	85_N620_1EA
		2	21_N620_2EA	85_N620_2EA
		4	21_N620_4EA	85_N620_4EA
Carregada	285	1	21_C285_1EA	85_C285_1EA
		2	21_C285_2EA	85_C285_2EA
		4	21_C285_4EA	85_C285_4EA
	420	1	21_C420_1EA	85_C420_1EA
		2	21_C420_2EA	85_C420_2EA
		4	21_C420_4EA	85_C420_4EA
	620	1	21_C620_1EA	85_C620_1EA
		2	21_C620_2EA	85_C620_2EA
		4	21_C620_4EA	85_C620_4EA
Flutuante	285	1	21_F285_1EA	85_F285_1EA
		2	21_F285_2EA	85_F285_2EA
		4	21_F285_4EA	85_F285_4EA
	420	1	21_F420_1EA	85_F420_1EA
		2	21_F420_2EA	85_F420_2EA
		4	21_F420_4EA	85_F420_4EA
	620	1	21_F620_1EA	85_F620_1EA
		2	21_F620_2EA	85_F620_2EA
		4	21_F620_4EA	85_F620_4EA

5.2.1. Preparação das amostras

As deformações nos fios de NiTi em forma de laçadas normal, carregada e flutuante foram realizadas por meio de um tear retilíneo eletrônico Stoll CMS 320 TC, através do processo de tricotagem, utilizando como base, um fio de acrílico 70 tex, e fios de NiTi, com diâmetro de 127 μm . Após a tricotagem, as malhas foram desmalhadas e retirados os fios de NiTi com as respectivas deformações de acordo com o tipo de laçada produzida (normal, carregada e flutuante).

As amostras a serem ensaiadas foram produzidas com comprimento de 12 cm, utilizando os fios de NiTi desmalhados, das estruturas produzidas, conforme anteriormente descritos, juntamente com fios de elastano de 285, 420 e 620 dtex, conforme configurações descritas no Quadro 9 e no Quadro 10. Estas amostras apresentam-se nas Figura 40, Figura 41 e Figura 42.

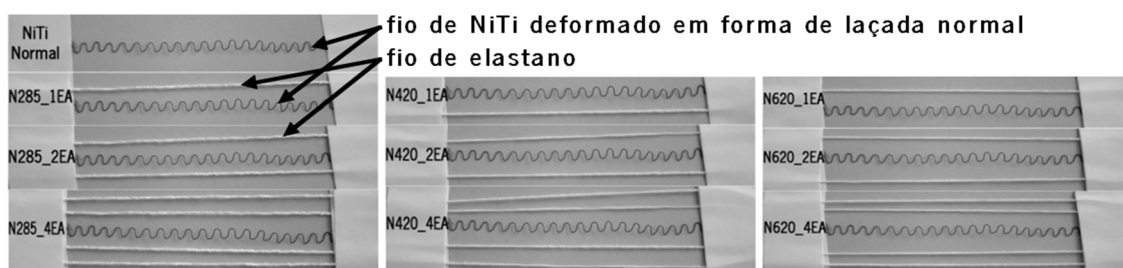


Figura 40 - Amostras contendo fios de NiTi deformado em laçadas normais em combinação com fios de elastano

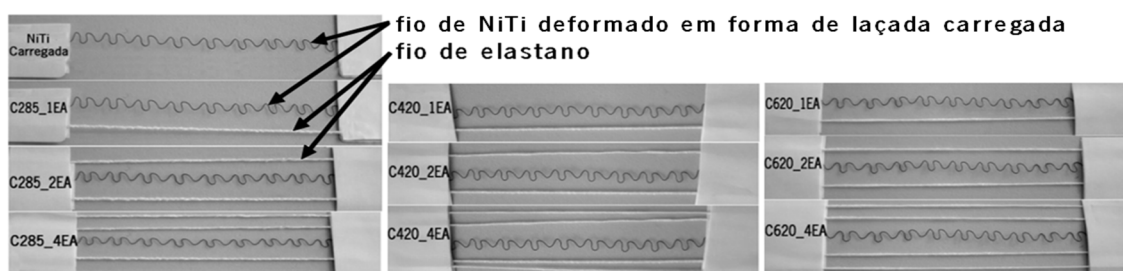


Figura 41 - Amostras contendo fios de NiTi deformado em laçadas carregadas em combinação com fios de elastano

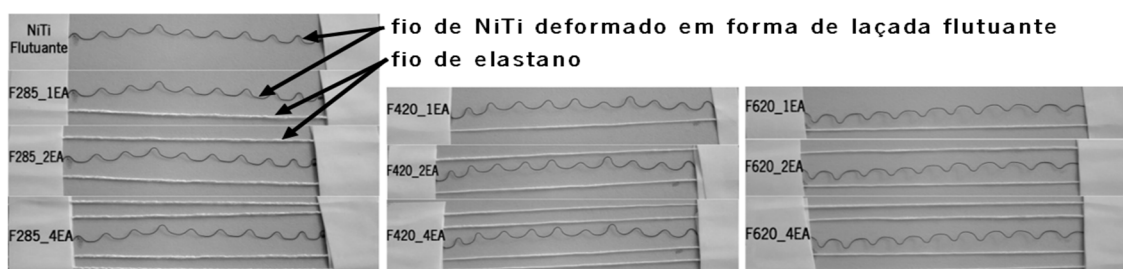


Figura 42 - Amostras contendo fios de NiTi deformado em laçadas flutuantes em combinação com fios de elastano

5.3. Ensaio de tração

Após a preparação das amostras, foram realizados ensaios de tração, com base na norma ISO 1462, utilizando um dinamômetro H100KS “*Hounsfield Universal Testing Instrument*”, equipado com uma câmara térmica com controlo da temperatura, mostrado na Figura 33, para que fosse possível analisar a influência da temperatura sobre os fios de NiTi contidos nas amostras.

Todos os ensaios foram realizados em um total de cinco repetições para que tenha um cunho científico, utilizando distância inicial entre as maxilas de 100 mm e velocidade de ensaio de 100 mm/min. e em temperaturas correspondentes a 21° C e 85° C, respectivamente.

Os ensaios foram conduzidos até que a deformação em forma de laçada no fio de NiTi contido na amostra fosse completamente desfeita, ou seja, até o momento em que a curva tensão deformação mostrava encontrar-se na fase de deformação elástica do fio de NiTi. Desta forma, não foi necessário conduzir o ensaio até à ruptura, conforme descrito na Figura 34 acima, uma vez que o objetivo deste estudo é conhecer a energia dos fios de NiTi quanto à forma de laçada na qual este se encontra deformado.

Os dados relativos à curva tensão/deformação para todos os ensaios foram armazenados e tratados, utilizando o software OriginPro[®] 8, afim de conhecer a influência da temperatura sobre os fios de NiTi contidos nas amostras, bem como a influência da massa dos fios de elastano que teoricamente apresenta uma força contrária à força produzida pelo fio de NiTi contido na amostra.

5.4. Análise dos resultados

5.4.1. Comportamento mecânico dos fios de NiTi e elastano

Inicialmente, foram ensaiados fios de NiTi em diferentes tipos de laçadas e fios de elastano de diferentes massas lineares, cujos resultados foram tratados e definidos os pontos de bloqueio, correspondentes ao final da deformação mecânica estrutural dos fios, conforme descrito por Araújo [9]. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Resultados obtidos no ponto de deformação estrutural máximo para fios unitários de elastano e de NiTi sob diferentes tipos de laçadas e temperaturas

Amostras	Força (N)		Extensão (%)	
	21° C	85° C	21° C	85° C
EA_285	1,38	1,40	391,5	391,0
EA_420	2,40	2,41	360,0	360,2
EA_620	1,76	1,75	390,5	390,8
NiTi_F	0,78	0,57	38,5	40,6
NiTi_N	0,87	0,94	79	77,4
NiTi_C	1,29	0,74	109,1	80,9

Os resultados obtidos evidenciam que quando ensaiados individualmente, os fios de NiTi, apresentam elevada força de tração e baixa deformação elástica quando comparados com os fios de elastano. Por outro lado, os fios de NiTi quando deformados em forma de laçadas, possuem excelentes força de recuperação da forma quando expostos na presença de temperatura. A Figura 43 mostra as curvas geradas somente para os fios unitários de NiTi deformados sob os diferentes tipos de laçada, tanto em temperatura ambiente (21° C), quanto em temperatura de transformação martensítica (85° C). A Figura 44, apresenta as curvas força-extensão relativas aos ensaios de tração para os diferentes tipos de fios de elastano utilizados nos ensaios.

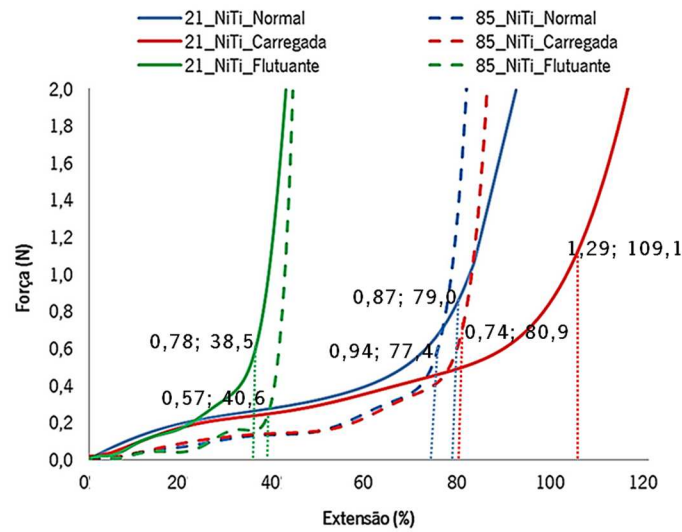


Figura 43 – Curvas carga-extensão para fios de NiTi sob a forma de laçada em diferentes temperaturas

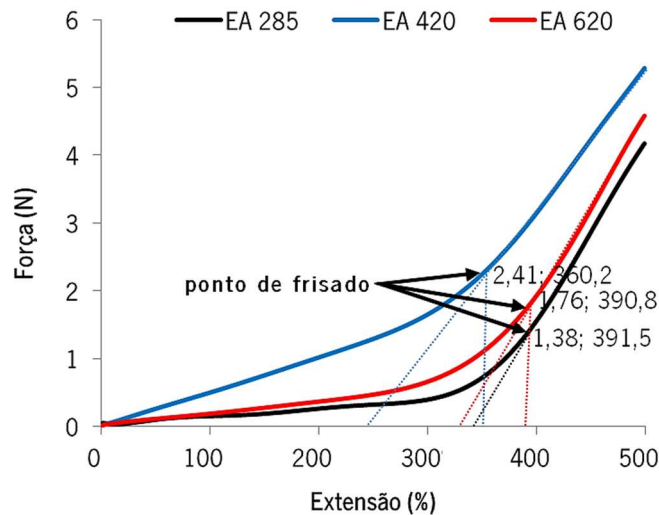


Figura 44 – Curva carga-extensão para fios de elastano

Ao analisar as curvas apresentadas, pode-se verificar que os fios de elastano possuem, notoriamente, uma superior elasticidade em comparação os fios de NiTi. Por outro lado, ao comparar os fios de NiTi, tanto à temperatura ambiente, quanto à temperatura de transição, ficou evidenciado que entre as deformações estudadas para os fios de NiTi, os fios deformados em laçadas flutuantes foram os que apresentaram menor elasticidade. Quanto aos fios de NiTi quando expostos à temperatura de transição, aqueles que estavam deformados em forma de laçadas normal e carregada, apresentaram características de alongamento e força muito próximos, embora os fios deformados em forma de laçadas carregadas apresentassem maior extensão. Neste ensaio também se pode observar que a temperatura influenciou fortemente o comportamento dos fios durante os ensaios de tração, à temperatura de 85° C, notoriamente

houve um decréscimo tanto o alongamento, bem como a força necessária para que a deformação fosse completamente desfeita.

Os diferentes fios elastoméricos estudados apresentaram comportamentos mecânicos muito semelhantes quando analisados pelo ponto de vista da extensibilidade. Por outro lado, à medida que foi aumentada a massa linear do fio, este apresentou possuir maior resistência à deformação, tal como seria de esperar. Entretanto, os fios elastoméricos estudados não apresentaram variância no comportamento quando ensaiados em diferentes níveis de temperatura.

5.4.2. Comportamento mecânico dos ensaios de tração dos conjuntos NiTi-Elastano

Os valores médios finais referentes aos pontos de bloqueio, correspondentes aos diferentes ensaios conduzidos para os provetes contendo fios de NiTi deformados sob diferentes tipos de laçadas, em conjunto com diferentes combinações de fios de elastano, são mostrados nos Quadro 12, Quadro 13 e no Quadro 14, respectivamente.

Quadro 12 – Pontos de bloqueio para as amostras contendo fios de NiTi deformados em forma de laçada normal em conjunto com fios de elastano

Amostras	Força (N)		Extensão (%)	
	21° C	85° C	21° C	85° C
N285_1EA	1,23	1,32	86,4	80,4
N285_2EA	1,32	1,27	88,2	107,6
N285_4EA	1,49	1,10	91,1	93,3
N420_1EA	1,19	1,18	81,7	83,4
N420_2EA	1,15	1,39	76,2	94,1
N420_4EA	1,65	1,52	72,6	97,1
N620_1EA	1,36	1,07	85,8	82,5
N620_2EA	1,53	1,42	86,7	96,1
N620_4EA	1,61	1,67	73,8	93,2

Quadro 13 - Pontos de bloqueio para as amostras contendo fios de NiTi deformados em forma de laçada carregada em conjunto com fios de elastano

Amostras	Força (N)		Extensão (%)	
	21° C	85° C	21° C	85° C
C285_1EA	0,74	1,06	80,9	100,0
C285_2EA	1,03	0,88	110,4	81,2
C285_4EA	1,37	0,95	111,7	82,9
C420_1EA	1,06	1,13	91,1	85,8
C420_2EA	1,05	1,05	77,7	77,7
C420_4EA	1,55	1,35	85,1	76,1
C620_1EA	1,19	1,00	82,4	80,6
C620_2EA	1,55	1,49	85,1	100,6
C620_4EA	1,63	1,69	64,3	96,8

Quadro 14 - Pontos de bloqueio para as amostras contendo fios de NiTi deformados em forma de laçada flutuante em conjunto com fios de elastano

Amostras	Força (N)		Extensão (%)	
	21° C	85° C	21° C	85° C
F285_1EA	0,80	1,53	55,4	45,0
F285_2EA	1,02	0,53	81,7	62,2
F285_4EA	1,09	0,62	80,3	62,9
F420_1EA	1,24	1,10	63,1	70,3
F420_2EA	1,20	0,78	63,5	59,2
F420_4EA	1,52	0,88	69,0	67,5
F620_1EA	1,60	0,68	70,5	52,9
F620_2EA	1,21	1,07	60,6	54,8
F620_4EA	1,33	1,45	48,1	71,3

5.4.3. Influência da temperatura

Os resultados obtidos para os ensaios de tração mostraram que a temperatura influenciou notavelmente o comportamento mecânico das amostras, para todos os tipos de laçadas nas quais os fios de NiTi estavam deformados.

Nos ensaios realizados a 85° C, os fios de NiTi contidos nas amostras, por estarem programados na forma linear, tenderam à voltar a forma previamente memorizada, aplicando esforço em sentido contrário aos fios de elastano contidos no conjunto, promovendo uma redução tanto da carga, como da extensão necessária para ocorrer a deformação do conjunto NiTi-elastano.

Tal fenómeno pode ser observado na Figura 45, obtida para fios de NiTi deformados em forma de laçadas carregada, em conjunto com fios de elastano de 285 dtex, ensaiados a 21° C e a 85° C, onde se evidencia que as amostras quando ensaiadas a 85° C, mostram uma notável redução tanto da força quanto do alongamento necessário para o bloqueio da estrutura e início da deformação elástica da amostra.

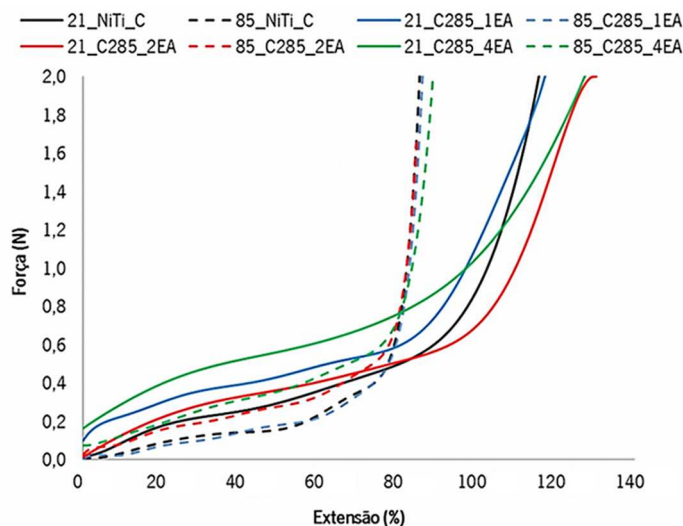


Figura 45 – Curva carga-extensão para fios de NiTi sob a forma de laçadas carregada e fios de elastano 285 dtex em diferentes temperaturas

Quanto à possível existência de correlação entre a força e os diferentes tipos de laçadas quando variamos a temperatura dos ensaios, ambas as combinações mostraram um decréscimo no grau de correlação à medida que foi aumentada a massa linear dos fios de elastano nas amostras, conforme mostrado na Figura 46.

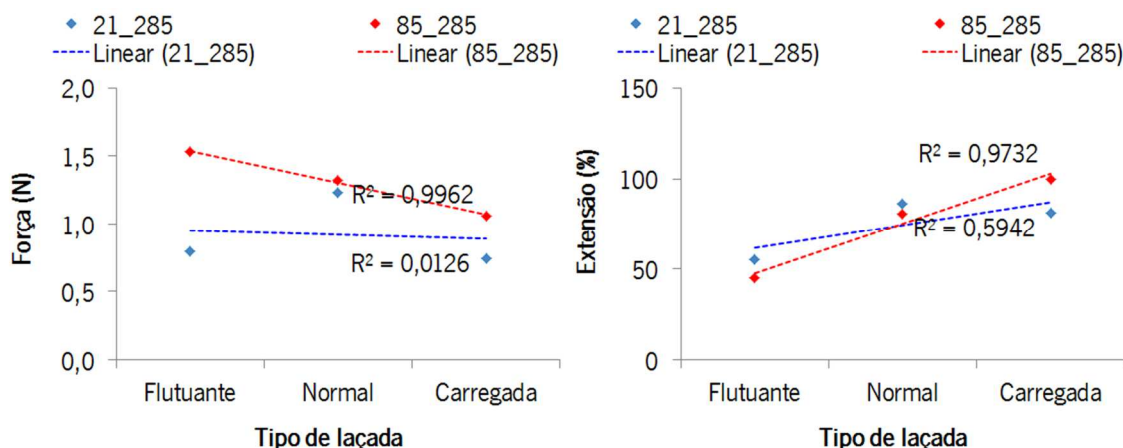


Figura 46 – Influência da temperatura sobre o comportamento mecânico das amostras em diferentes tipos de laçadas

5.4.4. Influência do tipo de laçada

Nesta parte do trabalho foi analisada a influência do tipo de laçada na qual os fios de NiTi se encontram deformados no comportamento do conjunto NiTi/Elastano utilizando diferentes massas lineares de fio elastomérico. Os ensaios foram igualmente realizados às duas temperaturas definidas anteriormente.

Ao analisar o comportamento das amostras contendo fios de NiTi deformados na forma de laçada normal combinados com fios de elastano em diferentes níveis de temperatura, mostrados na Figura 47, verifica-se que as curvas sofrem uma forte influência com o aumento da massa linear do elastano (dtex), bem como à medida que variou a temperatura dos ensaios. Entretanto, para aqueles provetes contendo fios de NiTi em combinação com fios de elastanos de 420 e 620, as curvas mostram que o fio de NiTi contido no provete possui menor influência no resultado dos ensaios do que a combinação dos fios elastoméricos.

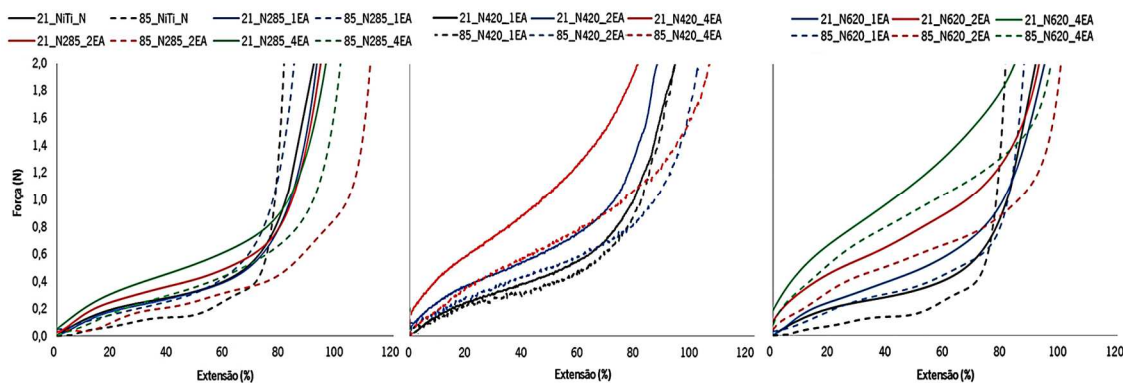


Figura 47 - Ensaio de tração da combinação dos fios de NiTi em laçadas normal com fios de elastano

Analisando sob o ponto de vista da influência da temperatura sobre as amostras contendo fios de NiTi na forma de laçada normal em conjunto com fios elastoméricos, mostrados na Figura 47, é conclusivo que os fios de NiTi contidos nas amostras ensaiadas foram fortemente influenciados pela mudança da temperatura, tanto sob a ótica da tensão do conjunto, como da deformação estrutural das mesmas.

Relativamente à influência da temperatura do ensaio sobre os fios de NiTi na forma de laçada normal, verificou-se que as amostras ensaiadas a 21° C apresentam menor extensibilidade, quando comparadas com as ensaiadas 85° C. No entanto, à medida que aumenta o número de fios de elastano nas amostras, há um considerável incremento na força. Desta forma, pode afirmar-se que à temperatura de 85° C as curvas sofreram alterações do comportamento nos seguintes pontos:

- aumento da extensão para as amostras que continham dois e quatro fios de elastano, e aumento da força apenas para as amostras que continham apenas um fio de elastano;
- decréscimo na extensão para os fios de NiTi e para aqueles que continham um elastano em sua composição.

Quanto ao comportamento dos fios de NiTi deformados na forma de laçada carregada, em conjunto com fios de elastano, ensaiados à temperatura ambiente (21° C) e à 85° C, conforme mostrado na Figura 48, percebe-se que com a variação na temperatura do ensaios para a temperatura de transformação martensítica do NiTi (85° C), foram observadas as seguintes alterações no comportamento das amostras:

- aumento da força e da extensão quando se combina apenas um fio de elastano;
- aumento da força quando se aumenta o número de fios de elastano (2 e 4 fios);
- aumento da extensão quando se aumenta o número de fios de elastano, no entanto, esse aumento não é diretamente proporcional ao aumento da quantidade de fios de elastano.

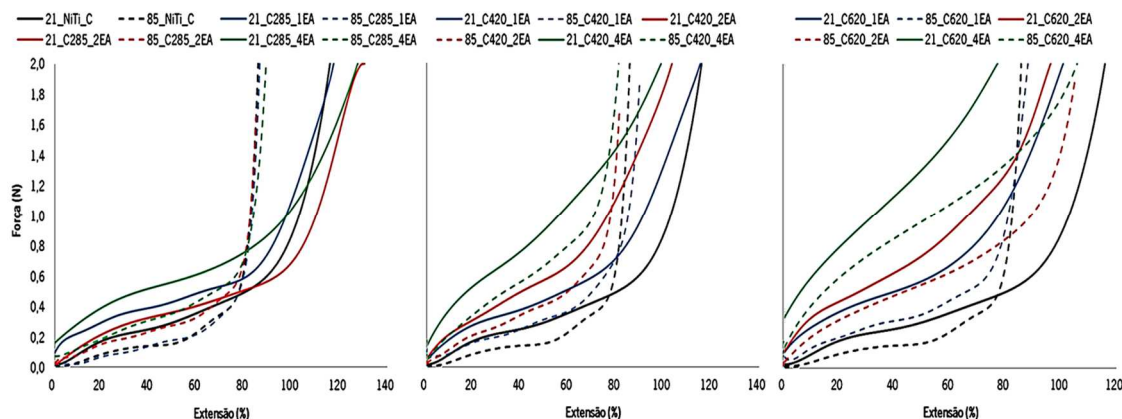


Figura 48 - Ensaio de tração da combinação dos fios de NiTi na forma de laçadas carregada com fios de elastano

As curvas traçadas, evidenciam que na combinação de um fio de elastano com um fio de NiTi as propriedades mecânicas do NiTi prevalecem sobre as do elastano, no entanto, quando se aumentou o número de fios elastanos, ocorre a situação contrária. Tal característica está intimamente ligada à alta resistência à tração do conjunto de fios de elastano quando comparados com a do NiTi unitariamente. Quanto à influência da temperatura sobre o tipo de laçada carregada, percebe-se de uma forma geral que o aumento da temperatura de ensaio de 21°C para 85°C fez diminuir a força dos conjuntos para ambos os ensaios com 1 e 2 fios elastanos, bem como diminuição na extensão para os ensaios com 1 fio elastano e um aumento para os demais estudados.

Ao analisar o comportamento apresentado na Figura 48, referente ao fio de NiTi na forma de laçada carregada em combinação com fios de elastano com massa linear de 285 dtex, verifica-se que, de uma forma geral, este tipo de forma de laçada influencia fortemente o seu comportamento, tanto na força quanto na extensão, independentemente do número de fios de elastano e da temperatura de ensaio, quando em comparação com o fio de NiTi unitariamente. Por outro lado, quando se aumentou a massa linear dos fios acima de 420 dtex, é possível verificar que o fio de NiTi na forma de laçada carregada, começa a perder esta predominância sobre o conjunto, passado a prevalecer as propriedades dos fios elastoméricos na amostra.

O resultado dos ensaios em diferentes níveis de temperatura para as amostras contendo fios de NiTi em forma de laçadas flutuante em combinação com fios elastoméricos são mostrados na Figura 49. As curvas traçadas definem que nos ensaios à temperatura de 85° C, as amostras sofreram uma redução tanto do alongamento quanto na força necessária para que o conjunto atingisse o ponto de bloqueio.

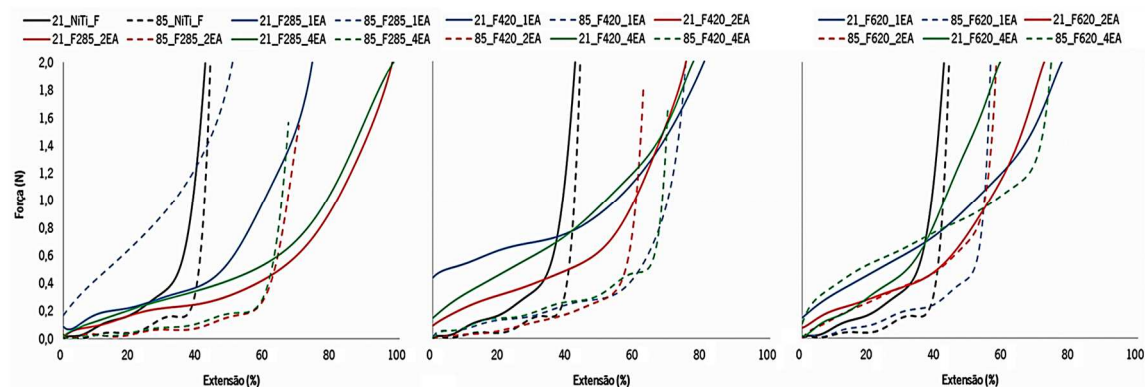


Figura 49 - Ensaio de tração da combinação dos fios de NiTi em laçadas flutuante com fios de elastano

As curvas referentes aos ensaios que continham fios de elastano de 420 dtex, mostrados na Figura 49, mostraram possuir melhor comportamento à temperatura de 85° C, quando comparados com aqueles com fios elastoméricos de 285 e 620 dtex, respectivamente. Ao analisar a força suportada pelo conjunto, demonstra-se que à medida que aumenta, tanto a massa linear dos fios elastoméricos, como a quantidade destes na amostra, existe um considerável aumento na força do conjunto. Esta força é claramente reduzida à medida que aumentou a temperatura dos ensaios para 85° C, correspondente à temperatura de transição martensítica dos fios de NiTi, fazendo com que estes fios tendessem a voltar à posição anteriormente memorizada (linear), levando a que houvesse uma diminuição na tensão do conjunto, bem como uma diminuição da extensão no ponto referente à linearidade do fio de NiTi.

5.4.5. Influência da massa linear dos elastanos

Os fios de NiTi deformados em diferentes tipos de laçadas, à medida que são expostos à temperatura, tendem a distender, voltando à posição anteriormente memorizada na forma linear. Por outro lado, os fios elastoméricos, possuem excelente elasticidade e quando utilizados em conjunto com fios de NiTi deformados na forma de laçadas, à medida que o conjunto é posto na presença de temperatura, os fios de NiTi tendem a promover esforço à dos fios elastoméricos, que por sua vez fornecem resistência ao conjunto. A fim de analisar o comportamento da combinação destes tipos de materiais, foram utilizados fios de NiTi em conjunto com fios elastoméricos de diferentes massas lineares (dtex) em ensaios mecânicos de tração.

Importantes considerações foram observadas quanto à influência da massa linear dos fios elastoméricos. Verificou-se que os fios elastoméricos à medida que aumenta a massa linear, aumentam a carga necessária para deformar o fio de NiTi para as laçadas flutuante e carregada, enquanto que para os conjuntos compostos de fios de NiTi na forma de laçadas normal, a força manteve-se praticamente inalterada. Tal observação leva a considerar que a energia de deformação do fio de NiTi na forma de laçadas flutuante e carregada, foi anulada pela tensão elástica dos fios de elastano contidos nas amostras. Por outro lado, os ensaios para fios de NiTi na forma de laçada normal, conseguiu reverter contrariamente a força dos fios elastoméricos, à medida que foi aumentada a massa linear, conforme mostrados na Figura 50a.

Quanto à influência da massa linear dos fios elastoméricos sobre a extensibilidade dos fios de NiTi em diferentes formas de laçadas estudadas, evidencia-se pelas curvas de correlação mostradas na Figura 50b, que mesmo aumentando a massa linear dos fios elastoméricos, os fios de NiTi na forma de laçadas flutuante e normal, houve uma redução na extensibilidade das amostras estudadas, enquanto que para aqueles deformados em forma de laçadas carregada, houve um pequeno aumento da extensão referente ao ponto de bloqueio, ou ponto no qual o fio de NiTi ficou completamente linear. Tais considerações apresentaram um excelente contributo para combinação em sistema alonga-encolhe, de acordo com a variação da temperatura.

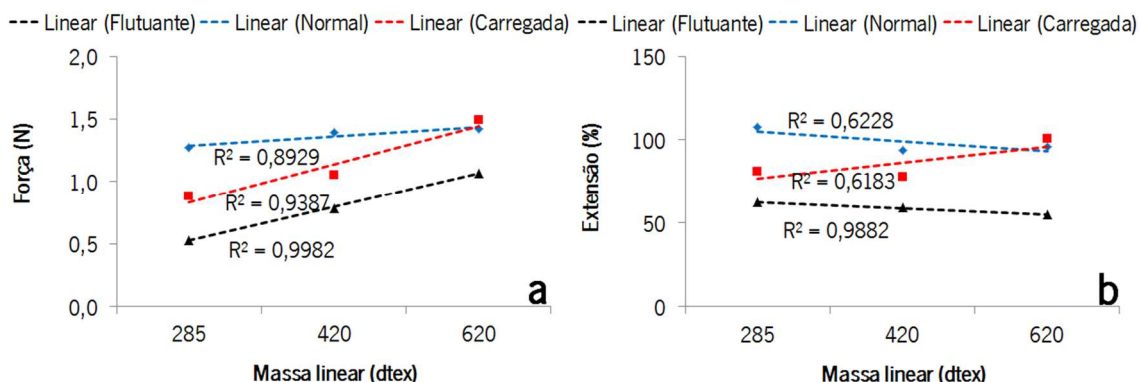


Figura 50 – Correlação entre a massa linear (dtex) dos elastanos e a forma de laçada do NiTi sobre a força (a) e extensão (b)

5.4.6. Influência do número de fios de elastano

Para os fios elastoméricos de 285 dtex, a Figura 51 mostra que de forma geral, o aumento na quantidade de fios elastoméricos nas amostras influenciou o resultado dos ensaios relativos à tensão/deformação dos diferentes tipos de laçadas nas quais os fios de NiTi estavam deformados. Por outro lado, percebe-se que o aumento na quantidade de fios elastoméricos no provete influenciou fortemente os ensaios que continham fios de NiTi na forma de laçadas flutuante, causando um decréscimo acentuado na força necessária para atingir a completa deformação dos fios de NiTi nos provetes. Por outro lado, quando analisados acerca do percentual de extensão, as curvas traçadas evidenciam haver uma maior influência da quantidade de fios de elastano, nos fios de NiTi para aqueles em forma de laçadas carregadas.

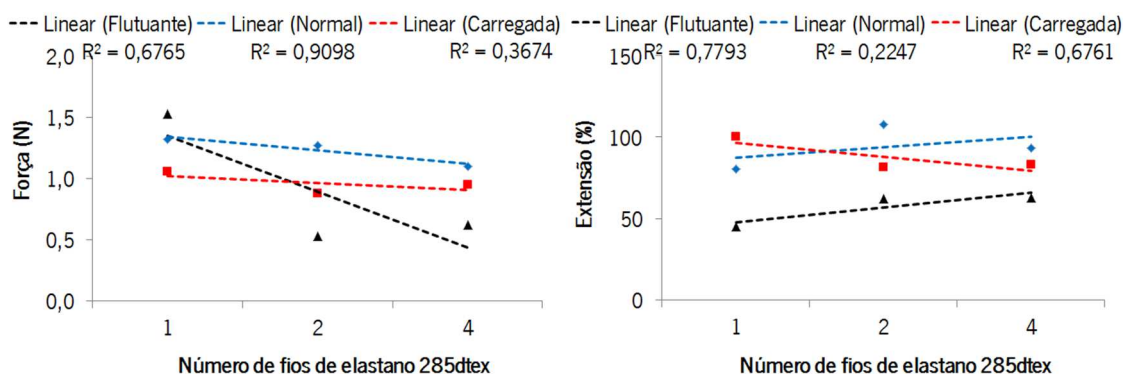


Figura 51 – Influência do número de fios de elastano 285 dtex sobre as diferentes formas de laçada em ensaios de tração

Os resultados obtidos para os fios de elastano 420 dtex, conforme mostrado na Figura 52, mostraram que o aumento na quantidade de fios nas amostras, praticamente não influenciou a extensibilidade dos provetes no ponto final de deformação da forma em que estavam os fios de NiTi. Por outro lado, mostram que o aumento na quantidade de fios elastoméricos nas amostras, fez reduzir a força necessária para a deformação total do fio de NiTi na forma de laçada flutuante, enquanto que para as demais, aumentou à medida que foi acrescido o número de fios de elastano nas amostras.

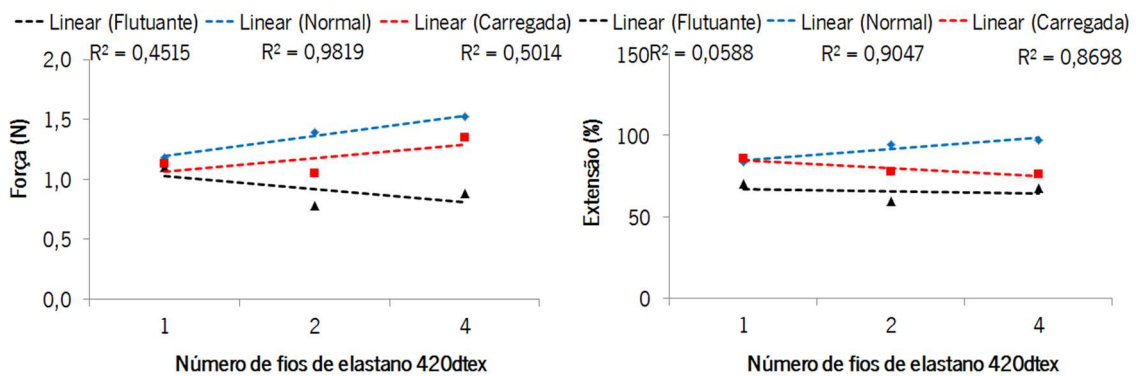


Figura 52 – Influência do número de fios de elastano 420 dtex sobre as diferentes formas de laçada em ensaios de tração

Quanto aos resultados dos ensaios para os provetes que continham os fios de NiTi em diferentes formas em conjunto com fios elastoméricos de 620 dtex, mostrados na Figura 53, estes evidenciam que o aumento na quantidade de fios elastoméricos nas amostras, fez com que também aumentasse, tanto a força do conjunto, como a extensão necessária para que houvesse uma total deformação da forma em que estavam deformados os fios de NiTi. A partir destes resultados, pode concluir-se que o fio elastomérico 620 dtex mostrou possuir uma rigidez elevada para ser movimentado pela deformação da forma do fio de NiTi, passando este a ter domínio sobre o NiTi e não o NiTi sobre o fio de elastano.

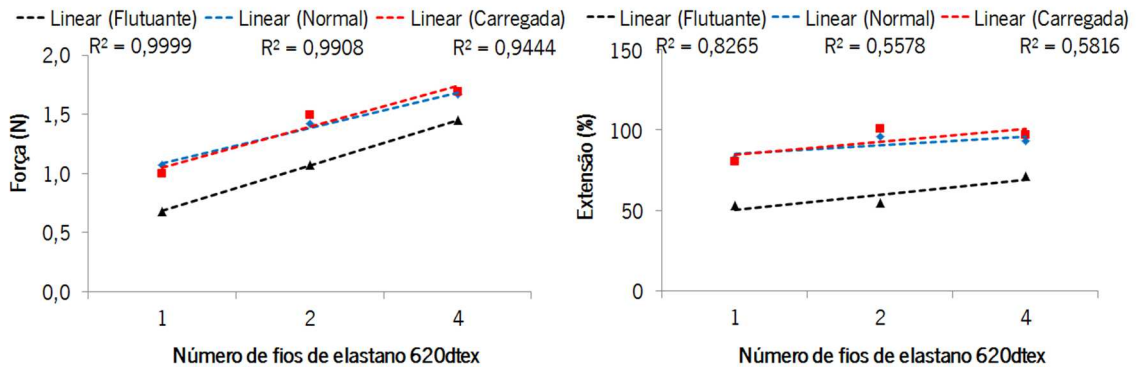


Figura 53 – Influência do número de fios de elastano 620 dtex sobre as diferentes formas de laçada em ensaios de tração

Finalmente, numa análise geral sobre as diferentes combinações estudadas à temperatura de 85° C, conforme mostrados na Figura 51, Figura 52, e Figura 53, percebe-se que o aumento na quantidade de fios de elastano no conjunto das amostras, influenciou fortemente os resultados dos ensaios no tocante à força necessária para a deformação da forma dos fios de NiTi à medida que foi aumentada a massa linear dos fios elastoméricos (dtex).

Os resultados também mostram que para os fios de 285 dtex de diâmetro, o aumento na quantidade de fios, decresceu a força necessária para atingir o bloqueio da estrutura, evidenciando que o diâmetro, assim como a quantidade de fios elastoméricos nas amostras influenciaram fortemente o comportamento do conjunto aos ensaios mecânicos.

Por outro lado, percebe-se que para os fios de 620 dtex, o ponto de bloqueio foi acrescido, à medida que foi aumentada a quantidade de fios, mostrando que este tipo de fio possui muita força, não sendo capaz de ser movimentado pelos diferentes tipos de laçadas nas quais os fios de NiTi estavam deformados.

5.5. Conclusões

No final deste capítulo, baseando-se num largo conjunto de ensaios e análises, apresentam-se algumas conclusões acerca do comportamento de fios de NiTi em diferentes formas de laçadas em combinação com fios elastoméricos.

Os fios de NiTi quando na presença de temperatura, tendem a voltar à forma linear inicialmente memorizada, deformando a forma de laçada na qual foi mecanicamente deformado. Por outro lado, os fios elastoméricos, em combinação com o fio de NiTi, oferece resistência contrária à deformação da forma de laçada dos fios de NiTi.

Para os fios de NiTi deformados na forma de laçadas carregada, quando combinados com fios de elastano de 285 dtex, verificou-se uma visível redução tanto da força, como do alongamento necessário para que ocorresse a deformação estrutural da forma de laçada. Tal comportamento evidencia que o fio de NiTi conseguiu fazer esforço contrário aos fios elastoméricos contido nas amostras.

Foi conclusivo que ambas as combinações ensaiadas mostraram que com o aumento da massa linear dos fios elastoméricos, decresceu o grau de correlação, conforme mostrado na Figura 50. Resultados levaram a concluir que utilização de mais que 1 fio de elastano com massa linear acima de 285 dtex em combinação com fio de NiTi de 127 μm , torna-se muito forte, fazendo com que o NiTi não exerça força suficiente para a movimentação do conjunto.

Foi constatado que a forma da laçada influenciou o comportamento mecânico dos ensaios para os conjuntos estudados. Ou seja, a forma de laçada flutuante foi a que apresentou menor relação entre os valores dos ensaios mecânicos quando realizados à temperatura ambiente (21° C) e à temperatura de transformação martensítica (85° C), tanto para a força (N), como para a extensão (%). Tal comportamento é atribuído à baixa deformação da forma da laçada do fio de NiTi, em comparação com as outras estudadas. Por outro lado, aqueles ensaios nos quais os fios de NiTi estavam deformados em forma de laçadas carregada, foram os que apresentaram maior relação entre os ensaios a 21° C e a 85° C.

Quanto à influência dos elastanos sobre o comportamento mecânico das amostras em presença de temperatura, foi observado que durante os ensaios, os fios metálicos de NiTi contido nas

amostras, quando ensaiados à temperatura de 85° C, reagiu movendo o conjunto em sentido contrário ao dos fios de elastano, que por sua vez, apresentaram força contrária à estes. No entanto, verificou-se que um considerável aumento tanto na massa linear, como na quantidade de fios de elastoméricos nas amostras, faz com que o fio de NiTi contido na estrutura tenha pouca influência sobre o comportamento do conjunto de fios elastoméricos, possuindo força superior àquela gerada pelo fio metálico.

Finalmente, pode concluir-se que a melhor combinação entre fios de NiTi e fios elastoméricos, no sentido de promover um comportamento dinâmico, em temperaturas ambiente e de transformação martensítica do NiTi, foi apresentado pela combinação de somente 1 fio de elastano, com massa linear de 285 dtex, com fio de NiTi deformado na forma de laçada carregada.

CAPÍTULO VI - Análise do comportamento de malhas de trama com fios com memória de forma

6.1. Introdução

De forma geral, os tecidos de malha de trama possuem maior elasticidade no sentido das fileiras do que no das colunas. Entretanto, a fim de estudar o comportamento deste tipo de estruturas combinando fios metálicos com memória de forma, nomeadamente o Nitinol, com fios de fibras convencionais, efetuou-se uma extensiva pesquisa bibliográfica que evidenciou a inexistência de estudos científicos neste domínio.

Os fios de NiTi contidos nas estruturas de malha de trama, quando expostos à temperatura, tenderão a voltar à sua forma linear, previamente memorizada, promovendo uma movimentação da própria estrutura da malha. Assim sendo, este capítulo objetiva estudar a combinação de fios de NiTi de 127 µm de diâmetro, deformados sob a forma de laçadas normal, carregada e flutuante, inseridos em tecidos de malha produzidas igualmente com fios de fibra acrílica de 60tex, sob diferentes densidades, a fim de determinar qual a melhor combinação, capaz de adquirir diferentes formas, quando na presença de calor.

6.2. Planeamento das experiências

A fim de avaliar o efeito dos fios de memória de forma no comportamento à tração de malhas de trama, a diferentes temperaturas, foi desenhado um conjunto de experiências, cujo planeamento se apresenta no Quadro 15.

.

Quadro 15 - Fatores utilizados para planificação das experiências dos ensaios de tração

Parâmetros	Tipos de laçadas		
	Normal	Carregada	Flutuante
Fio base	Acrílico 60 tex	Acrílico 60 tex	Acrílico 60 tex
Fio com memória de forma	NiTi 127 µm	NiTi 127 µm	NiTi 127 µm
Configuração das Amostras	1 fileira de NiTi/3 fileiras de fibra acrílica – 1N/3Ac	1 fileira de NiTi/3 fileiras de fibra acrílica – 1N/3Ac	1 fileira de NiTi/3 fileiras de fibra acrílica – 1N/3Ac
	1 fileira de NiTi/3 fileiras de fibra acrílica – 1N/5Ac	1 fileira de NiTi/3 fileiras de fibra acrílica – 1N/5Ac	1 fileira de NiTi/3 fileiras de fibra acrílica – 1N/5Ac
	1 fileira de NiTi/7 fileiras de fibra acrílica – 1N/7Ac	1 fileira de NiTi/7 fileiras de fibra acrílica – 1N/7Ac	1 fileira de NiTi/7 fileiras de fibra acrílica – 1N/7Ac
	1 fileira de NiTi/9 fileiras de fibra acrílica – 1N/9Ac	1 fileira de NiTi/9 fileiras de fibra acrílica – 1N/9Ac	1 fileira de NiTi/9 fileiras de fibra acrílica – 1N/9Ac
Temperatura de ensaio	21° C	21° C	21° C
	85° C	85° C	85° C

Para realização dos ensaios, foi necessária a preparação de um conjunto de amostras contendo fios de base de fibra acrílica de 60 tex, juntamente com fios de NiTi de 127 µm de diâmetro, sob diferentes densidades (relação entre a quantidade de fileiras de fios de fibra acrílica sobre 1 fileira de fio de NiTi) para que fossem ensaiadas, a fim de se estudar o desempenho de fios de NiTi em malhas de trama em tração, variando:

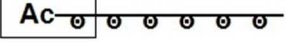
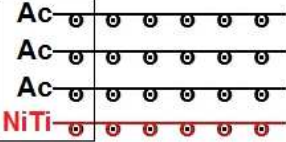
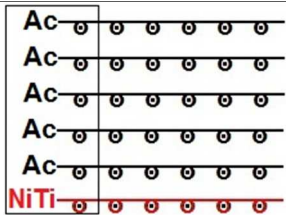
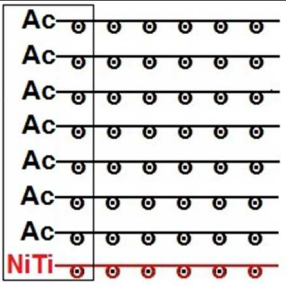
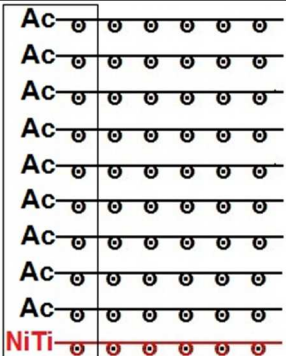
- A densidade de fios nas amostras;
- Os tipos de laçada (normal, carregada e flutuante);
- A temperatura (ambiente - 21° C e temperatura de transformação martensítica do NiTi - 85° C);

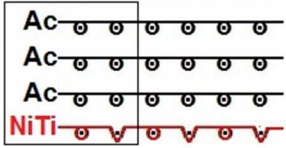
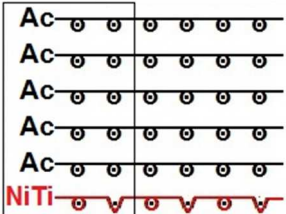
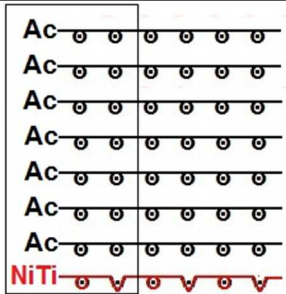
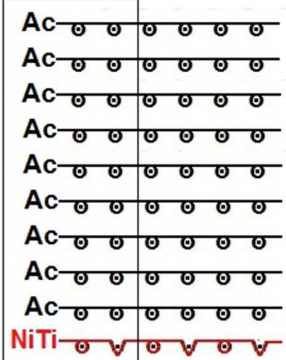
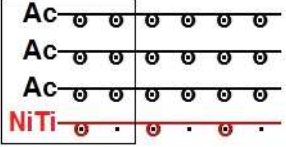
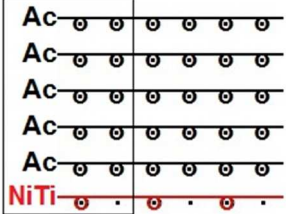
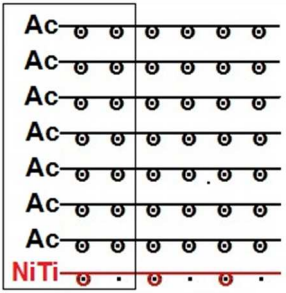
A configuração das estruturas foi escolhida, a fim de avaliar a influência do tipo de laçada, bem como da densidade de fios de NiTi sobre a resistência à tração dos materiais à temperatura ambiente e à temperatura de transformação martensítica do NiTi (85° C).

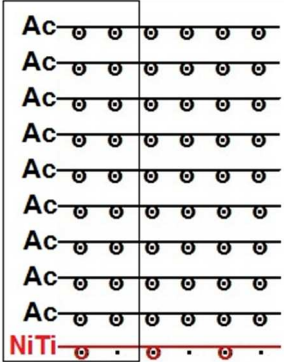
Tendo como base o Quadro 15 e combinando os fatores do estudo nos diferentes níveis, foi necessário construir um conjunto de amostras para a realização do presente estudo. Para cada amostra foram ensaiados 5 provetes.

As diferentes combinações são apresentadas no Quadro 16.

Quadro 16 - Planificação das amostras de malhas de trama

Densidade de fios (NiTi/Acrílico)	Codificação	Representação esquemática
Malha de base com fios acrílico em laçada normal	Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada normal e 3 fios de acrílico	N_1NiTi/3Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada normal e 5 fios de acrílico	N_1NiTi/5Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada normal e 7 fios de acrílico	N_1NiTi/7Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada normal e 9 fios de acrílico	N_1NiTi9Ac	

Malha com 1 fio de NiTi em laçada carregada e 3 fios de acrílico	C_1NiTi/3Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada carregada e 5 fios de acrílico	C_1NiTi/5Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada carregada e 7 fios de acrílico	C_1NiTi/7Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada carregada e 9 fios de acrílico	C_1NiTi/9Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada flutuante e 3 fios de acrílico	F_1NiTi/3Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada flutuante e 5 fios de acrílico	F_1NiTi/5Ac	
Malha com 1 fio de NiTi em laçada flutuante e 7 fios de acrílico	F_1NiTi/7Ac	

<p>Malha com 1 fio de NiTi em laçada flutuante e 9 fios de acrílico</p>	<p>F_1NiTi/9Ac</p>	
---	--------------------	---

A avaliação do comportamento à tração das estruturas de malha construídas, conforme o Quadro 16 acima, foi efetuado com o objetivo de, além de caracterizar a estrutura quando inserido material com memória de forma, analisar igualmente a influência dos fios com memória de forma em diferentes densidades na estrutura, bem como variando a forma das laçadas nas quais os fios estavam deformados.

6.2.1. Produção das amostras

Inicialmente foram produzidos tecidos de malha de trama para que fossem recortadas amostras a serem ensaiadas posteriormente. As malha foram produzidas através do processo de tricotagem, utilizando o fio de acrílico de 60 tex como base, juntamente com fios de NiTi de 127 µm de diâmetro, num tear retilíneo eletrônico Stoll CMS 320 TC, mostrado na Figura 54.



Figura 54 - Tear retilíneo eletrônico Stoll CMS 320 TC

As propriedades físicas das malhas produzidas são apresentadas no Quadro 17, enquanto que a Figura 55 ilustra uma amostra em laçadas carregada.

Quadro 17 – Propriedades das amostras de malhas de trama produzidas

Parâmetros	Tipos de laçadas		
	Normal	Carregada	Flutuante
Fio de base	Acrílico 60 tex	Acrílico 60 tex	Acrílico 60 tex
Fio com memória de forma	NiTi 127 μm	NiTi 127 μm	NiTi 127 μm
Nº fileiras/cm	10	10	10
Nº de colunas/cm	4	4	4
Massa por unidade de superfície g/m^2	233,5	243,2	220,6
Grau de aperto [140]	12,9	9,7	8,6



Figura 55 - Amostra de malha de fios acrílico/NiTi em laçada carregada

6.2.2. Corte e preparação das amostras

Para o corte e preparação das amostras, depois de consultadas diversas normas, as quais não se apresentaram adequadas para este fim, foi criado um procedimento interno, baseado na norma ISO 13934-2:1999 [141], o qual foi utilizado para análise comparativa entre todas as amostras estudadas.

De acordo com Fangueiro [4], o ensaio de tração uniaxial, constitui um método fundamental para a obtenção de dados necessários para a especificação do material, bem como para inspeção, investigação, projeto e desenvolvimento de componentes estruturais. A partir deste conceito, as amostras a serem ensaiadas foram cortadas e confeccionadas com largura constante, objetivando garantir uma maior fiabilidade e consistência nos resultados dos ensaios, conforme apresentado na Figura 56. Assim sendo, as amostras constituíram-se de uma região de amarração, com comprimento de 10 mm em cada extremidade, suficiente para colocação nas maxilas, região onde as cargas são introduzidas às superfícies, e uma região de ensaio, com dimensões de 25 x 50 mm de comprimento, tanto no sentido das colunas (a), quanto das fileiras (b).

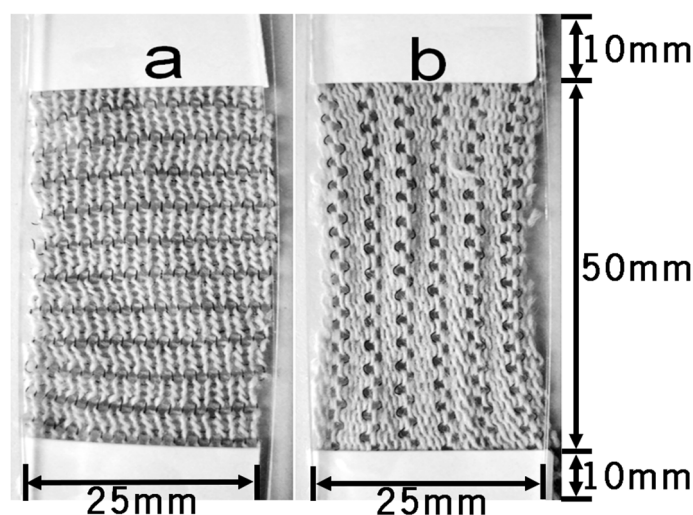


Figura 56 - Tipos de provetes utilizados nos ensaios de tração

6.2.3. Ensaios e avaliação das propriedades de tração

Após a preparação das amostras, foram realizados ensaios de tração, com base na norma ASTM D5034-09 [142], utilizando um dinamômetro H100KS “*Hounsfield Universal Testing Instrument*”, equipado com uma câmera térmica com controle de temperatura, conforme mostrado no capítulo anterior, para que fosse possível estudar o comportamento das malhas de acrílico com fios de NiTi em diferentes configurações de laçada, densidade e diferentes níveis de temperatura, conforme descritos no Quadro 16 acima.

Para cada tipo de estrutura foram ensaiados 5 provetes, utilizando distância inicial entre as maxilas de 50mm, velocidade de ensaio de 50 mm/min. e temperaturas correspondentes a 21° C e 85° C, respectivamente. A Figura 57 ilustra os ensaios de tração no sentido das fileiras (a) e das colunas (b), referente a uma amostra contendo cinco fios de acrílico e um fio de NiTi deformados em forma de laçadas carregadas.

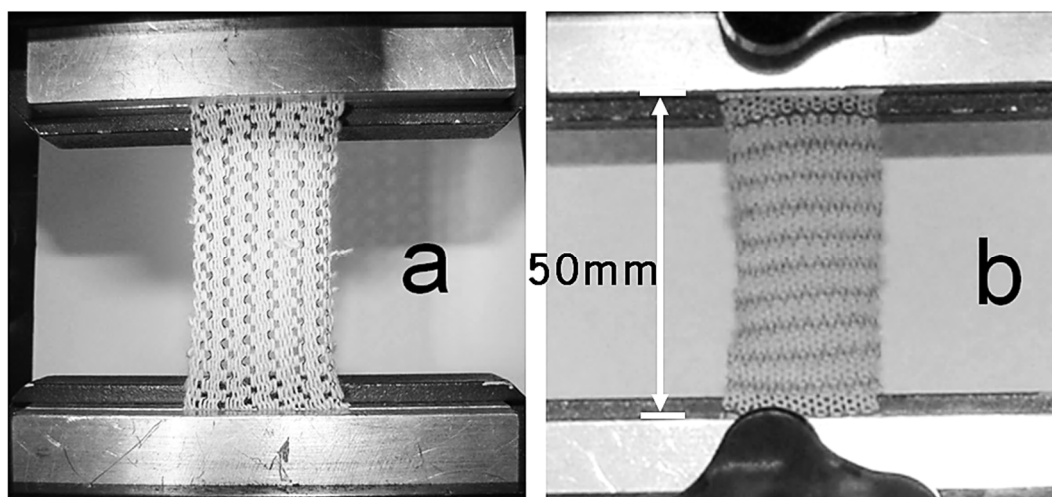


Figura 57 - Ensaio de tração das malhas, no sentido das fileiras (a) e no sentido das colunas (b)

Para a realização dos ensaios de tração, foram seguidos os seguintes procedimentos e cuidados:

- Medição das dimensões de largura e comprimento das amostras;
- Colocação das amostras nas maxilas do dinamômetro, observando o alinhamento do provete com o eixo das maxilas, os quais foram fortemente apertados a fim de evitar qualquer deslizamento das amostras nas maxilas durante os ensaios;
- Regulação de todas as constantes maquinado equipamento, incluindo a velocidade dos ensaios, correspondentes ao comprimento das amostras, que foi de 50 mm/min.
- Todos os ensaios foram realizados até que fosse possível verificar a formação de uma curva inicial correspondente à deformação mecânica do material, seguidamente por uma região correspondente à deformação da estrutura do material até atingir um ponto de bloqueio da estrutura têxtil, verificando-se a partir deste ponto, uma linearidade da curva tensão/deformação, correspondente à deformação elástica do material. Todos os ensaios foram parados durante a deformação elástica do material, não levando ao ponto de ruptura das amostras, conforme mostrado na Figura 58.

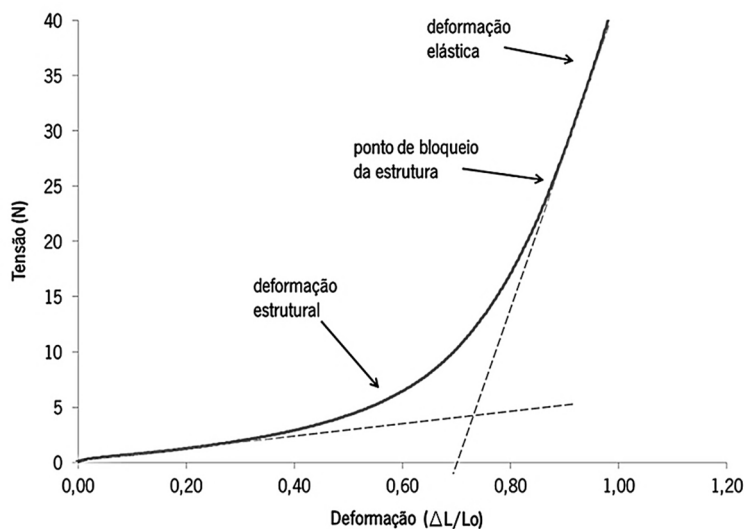


Figura 58 - Áreas de deformações de um provete de malha de trama na curva tensão-deformação [9]

6.2.4. Discussão dos resultados

6.2.4.1. Comportamento mecânico das malhas com fios de NiTi

Os resultados dos ensaios realizados para os diferentes tipos de malha, mostraram que o fio de NiTi na estrutura, influencia consideravelmente o comportamento mecânico das mesmas, conforme mostrado na Figura 59.

O fio de NiTi, por possuir alta resistência à tração e baixa flexibilidade, quando comparado ao fio de base, em acrílico, alterou consideravelmente o comportamento das amostras quantos aos ensaios mecânicos de tração, tanto no que diz respeito à força, quanto à extensão necessária para deformar a estrutura de malha de trama até o ponto de bloqueio da estrutura. Observa-se que as malhas sem fios de NiTi na estrutura apresentaram reduzida extensão no sentido das colunas e expressiva extensão no sentido das fileiras. Por outro lado, à medida que foram acrescentados fios de NiTi na estrutura, verificou-se um significativo aumento na extensão no sentido das colunas e comportamento inverso no sentido das fileiras, reduzindo a extensão das amostras, à medida que diminuiu a densidade de fios de fibra acrílica nas amostras.

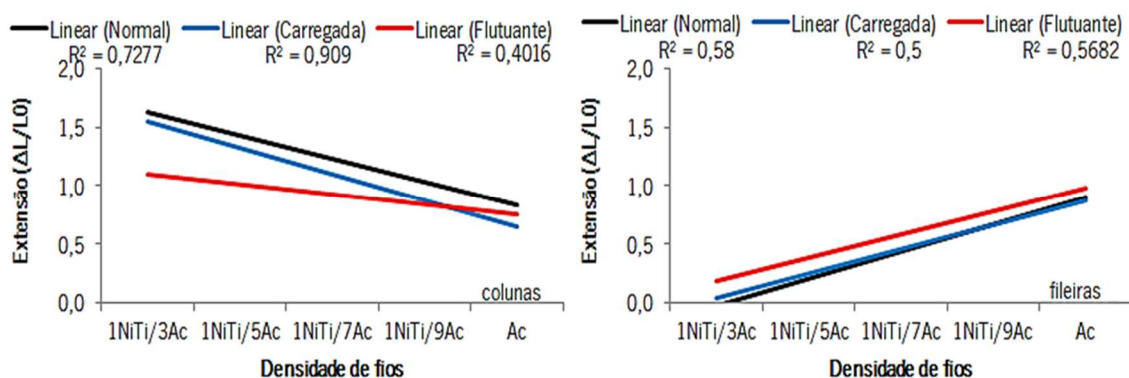


Figura 59 - Comportamento mecânico para malhas de fibra acrílica em diferentes densidades de NiTi

Por outro lado, quando analisado o comportamento das amostras, no que diz respeito à força necessária para atingir o ponto de bloqueio [9], conforme mostrado na Figura 60, verifica-se que, tanto no sentido das colunas como no sentido das fileiras, houve uma diminuição na força à medida que diminuiu a densidade de fios de fibra acrílica nas amostras, sendo com maior intensidade no sentido das colunas.

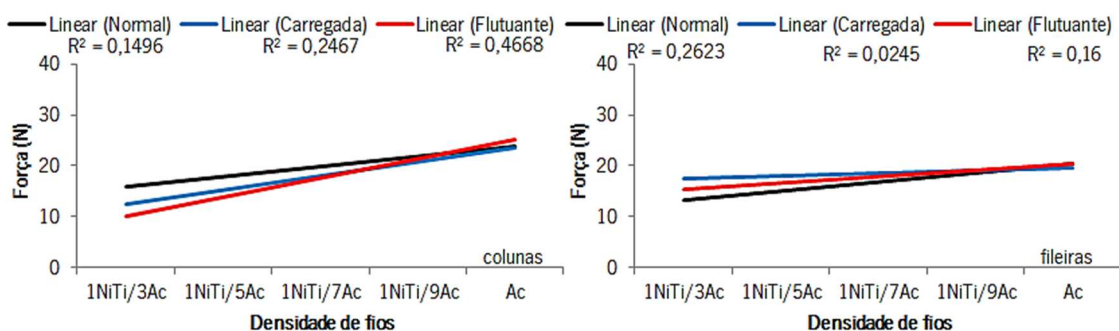


Figura 60 - Comportamento mecânico para malhas de fibra acrílica em diferentes densidades de NiTi

6.2.4.2. Influência da densidade dos fios de NiTi/fibra acrílica

Os resultados obtidos para os ensaios realizados no sentido das colunas, conforme mostrados na Figura 59, mostraram haver uma relação forte entre a densidade de fios de NiTi e de fibra acrílica contidas nas amostras, de tal modo que à medida que diminuiu a densidade de fios de fibra acrílica sobre fios de NiTi, houve um aumento na extensão e um decréscimo na força necessária para o bloqueio da estrutura. Por outro lado, quando ensaiados no sentido das fileiras, as amostras apresentaram um comportamento inverso, diminuindo a extensão e

aumentando a força necessária para atingir o ponto de bloqueio, ou ponto no qual há um travamento e se inicia a deformação elástica da estrutura.

Dentre todos os ensaios realizados, quando analisados sob a ótica da densidade de fios de NiTi sobre fios de fibra acrílica, as curvas mostraram não haver, de um modo geral, uma relação linear significativa entre a densidade e os tipos de laçadas nas quais os fios de NiTi estavam deformados, tanto no que diz respeito à extensão, como à força. Excetua-se neste particular aquelas amostras que continham fios de NiTi deformados em forma de laçadas carregadas, quando analisadas sob o ponto de vista da extensão necessária para atingir a completa deformação estrutural, conforme mostrado na Figura 59 e na Figura 60, respectivamente.

Diferentemente das malhas construídas com fios não metálicos apresentando um maior alongamento no sentido das fileiras, as estruturas ensaiadas, mostraram maior alongamento no sentido das colunas. Tal comportamento está diretamente relacionado com as propriedades de rigidez e flexão dos fios metálicos de NiTi [143] que se encontram entrelaçados no sentido das fileiras, fazendo com que a estrutura apresentasse uma menor deformação no sentido das fileiras do que no sentido das colunas.

6.2.4.3. Influência da forma da laçada

Os resultados dos ensaios realizados para ambas as amostras, conforme mostrados na Figura 61 e na Figura 62, quanto à extensão e à força, respectivamente, demonstraram que o tipo de laçada influenciou fortemente o comportamento das estruturas. Verificou-se que nas curvas obtidas para os ensaios no sentido das colunas, os valores de extensão cresceram de acordo com o tipo de laçada, sendo que a laçada flutuante apresenta valores inferiores às demais, devido ao fato de o comprimento deste tipo de laçada ser inferior, quando comparada às demais estudadas. Por outro lado, no sentido das fileiras, ocorreu comportamento inverso, fenômeno intrinsecamente atribuído à disposição do fio metálico de NiTi contido na estrutura, estar disposto justamente no sentido da fileira, fazendo com que as propriedades de rigidez do fio de NiTi sejam transferidas para a estrutura.

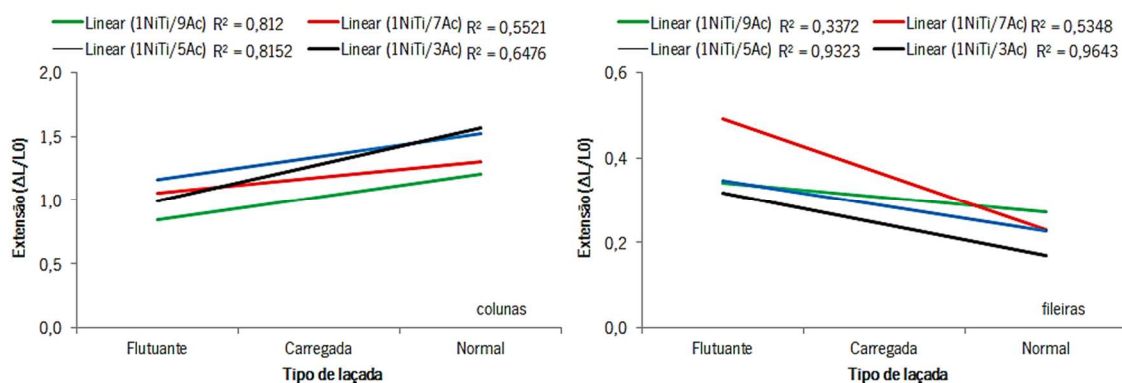


Figura 61 - Comportamento mecânico quanto à extensão para as diferentes formas de laçadas

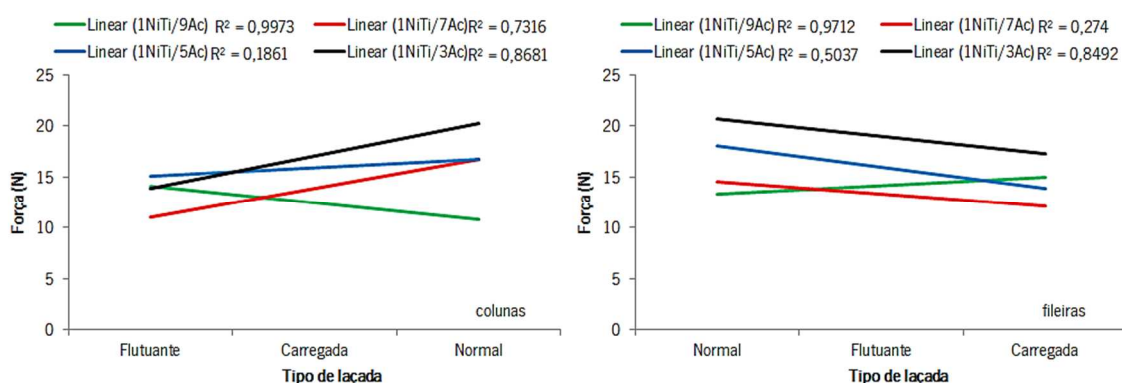


Figura 62 - Comportamento mecânico quanto à força para as diferentes formas de laçadas

As curvas mostradas na Figura 61, evidenciam que no sentido das colunas existe um menor alongamento para as amostras em laçada flutuante e maior para a laçada normal. Por outro lado, no sentido das fileiras, percebe-se um comportamento inverso.

Quanto aos resultados mostrados na Figura 62 acima, evidencia haver uma forte contribuição do tipo de laçada na qual os fios de NiTi contidos nas estruturas estejam deformados, verificados que quando na forma de laçadas flutuantes, apresentam menor força para tração no sentido das colunas, por outro lado, ocorre o efeito inverso quando ensaiados no sentido das fileiras. Ficou igualmente evidenciado que, de acordo com a densidade de fios NiTi/acrílico na estrutura, é possível determinar qual a força suportada pelo conjunto sem que haja uma rotura da estrutura.

6.2.4.4. Influência da temperatura nos ensaios de tração

Foram realizados ensaios de tração à temperatura ambiente (21° C) e à temperatura de transformação martensítica do NiTi (85° C), a fim de estudar a influência da temperatura sobre as propriedades mecânicas das malhas de trama de fibra acrílica em diferentes densidades, em combinação com fios de NiTi, deformados em diferentes tipos de formas de laçadas.

Os resultados referentes à influência da temperatura (temperatura ambiente e à temperatura de transformação martensítica do NiTi) sobre a extensão máxima relativa ao ponto de bloqueio das diferentes estruturas estudadas, no sentido das colunas e das fileiras, apresentam-se na Figura 63.

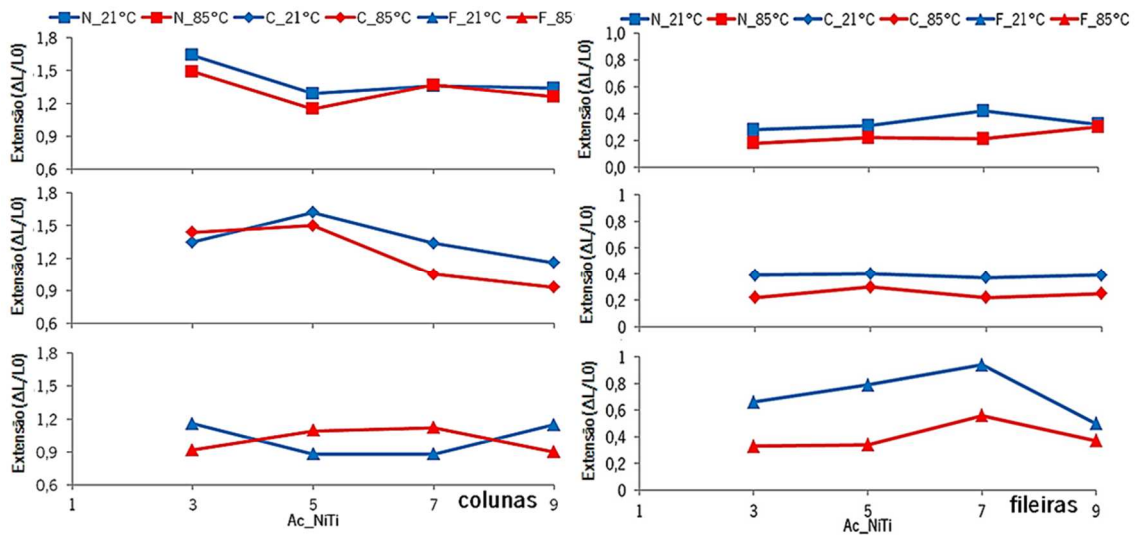


Figura 63 - Influência da temperatura sobre a extensão para os diferentes tipos de laçadas no sentido das colunas e das fileiras

De acordo com a Figura 63, observa-se que na mudança na temperatura para o ponto de mudança de fase martensite/austenite do NiTi, o fio metálico mudou de forma, alterando o comportamento quanto à extensão necessária ao ponto de bloqueio. Tal fenómeno foi mais evidenciado nos ensaios de tração realizados no sentido das fileiras, os quais apresentaram uma redução do ponto de bloqueio das estruturas para ambos os tipos de laçadas. Tal comportamento era esperado, porque os fios de NiTi, que são sensíveis à temperatura, estavam justamente dispostos no sentido das fileiras, e à medida que foram postos em presença de temperatura, mudaram de forma, movendo a estrutura no sentido das fileiras, reduzindo o comprimento máximo de deformação no ponto de bloqueio da estrutura.

Por outro lado, quando analisamos a existência ou não de correlação entre as diferentes densidades e as temperaturas de ensaio, conforme mostrado na Figura 64, percebe-se que não ha correlações lineares significativas entre as diferentes densidades nas amostras e a extensão necessária ao bloqueio destas.

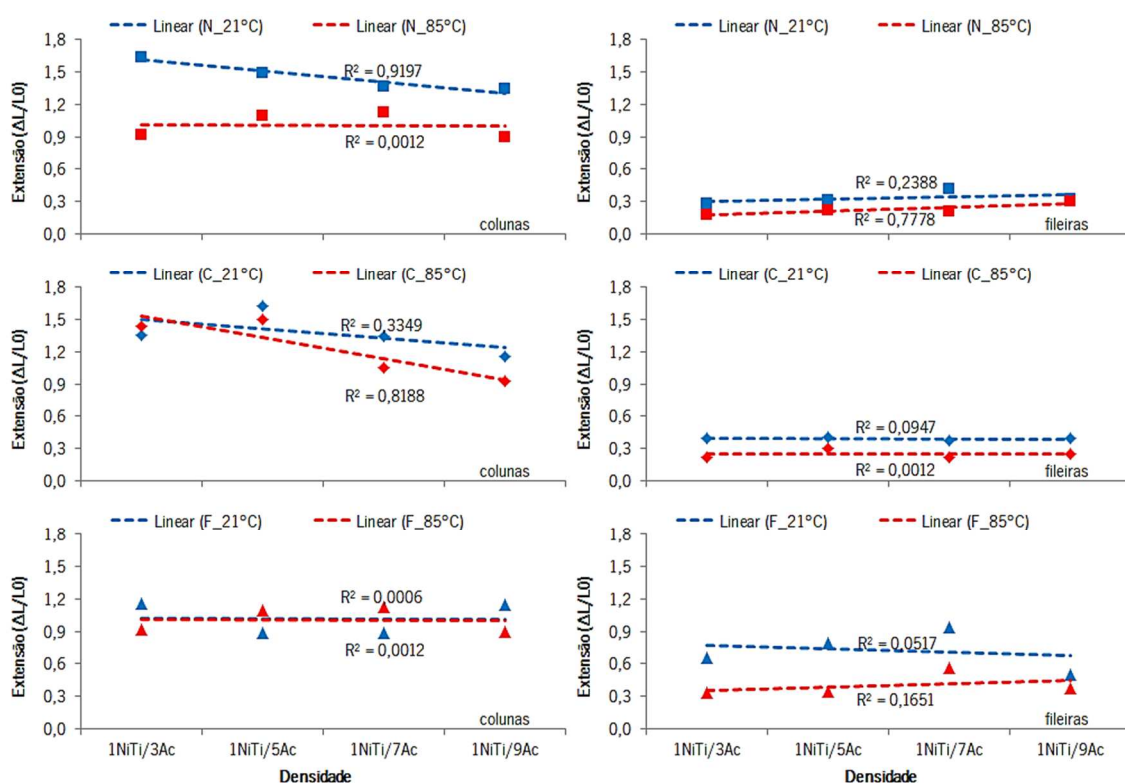


Figura 64 - Correlação linear do comportamento das malhas de trama sobre a temperatura quanto à extensão no sentido das colunas e das fileiras

Verificou-se que nos conjuntos de amostras com laçadas normal, à medida que variou a densidade, apresentaram uma ótima correlação linear para os ensaios realizados no sentido das colunas somente à temperatura ambiente, ocorrendo fenômeno inverso, quando ensaiados no sentido das fileiras, que apresentou boa correlação em temperatura de transformação martensítica do NiTi, evidenciando a movimentação dos fios de NiTi contidos na estrutura.

Para os ensaios realizados com os conjuntos de estruturas com laçadas carregadas, verificou-se que estas somente apresentaram boa correlação para as amostras ensaiadas no sentido das colunas a 85° C, as quais denotam que houve uma redução na extensão necessária para o bloqueio das estruturas, à medida que aumentou a densidade de fios de acrílico nas estruturas.

Para os conjuntos de estruturas com laçadas flutuante, ambos os ensaios realizados tanto no sentido das colunas quanto das fileiras, apresentaram correlações desprezíveis para ambas as temperaturas ensaiadas sobre as diferentes densidades de fios de NiTi e acrílico nas estruturas.

As curvas contendo os resultados referentes à influência da temperatura (temperatura ambiente e temperatura de transformação martensítica do NiTi) sobre a força máxima necessária para provocar o bloqueio das estruturas estudadas em diferentes tipos de laçadas, ensaiadas no sentido das colunas e das fileiras, são mostrados na Figura 65.

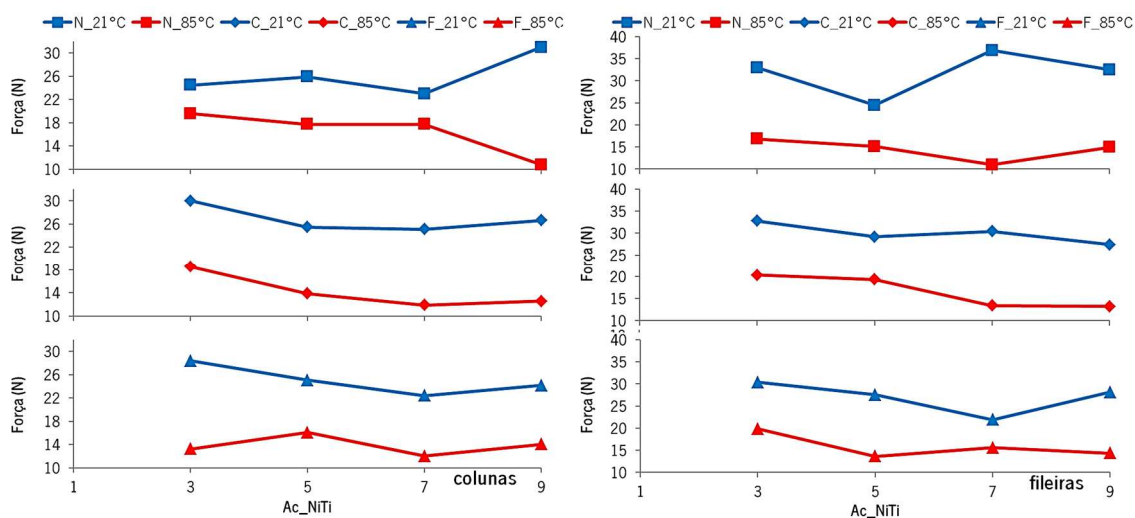


Figura 65 - Influência da temperatura sobre a extensão para os diferentes tipos de laçadas no sentido das colunas e das fileiras

Os resultados mostraram que a temperatura influenciou fortemente a força máxima necessária para atingir o ponto de bloqueio de ambas as amostras estudadas, tanto no sentido das colunas quanto das fileiras. Também se observa que para as estruturas com laçadas normal e carregada, quando ensaiadas tanto no sentido das colunas como das fileiras, à medida que diminuiu a densidade de fios de NiTi, existe um decréscimo linear da força no ponto de bloqueio, conforme mostrado na Figura 66.

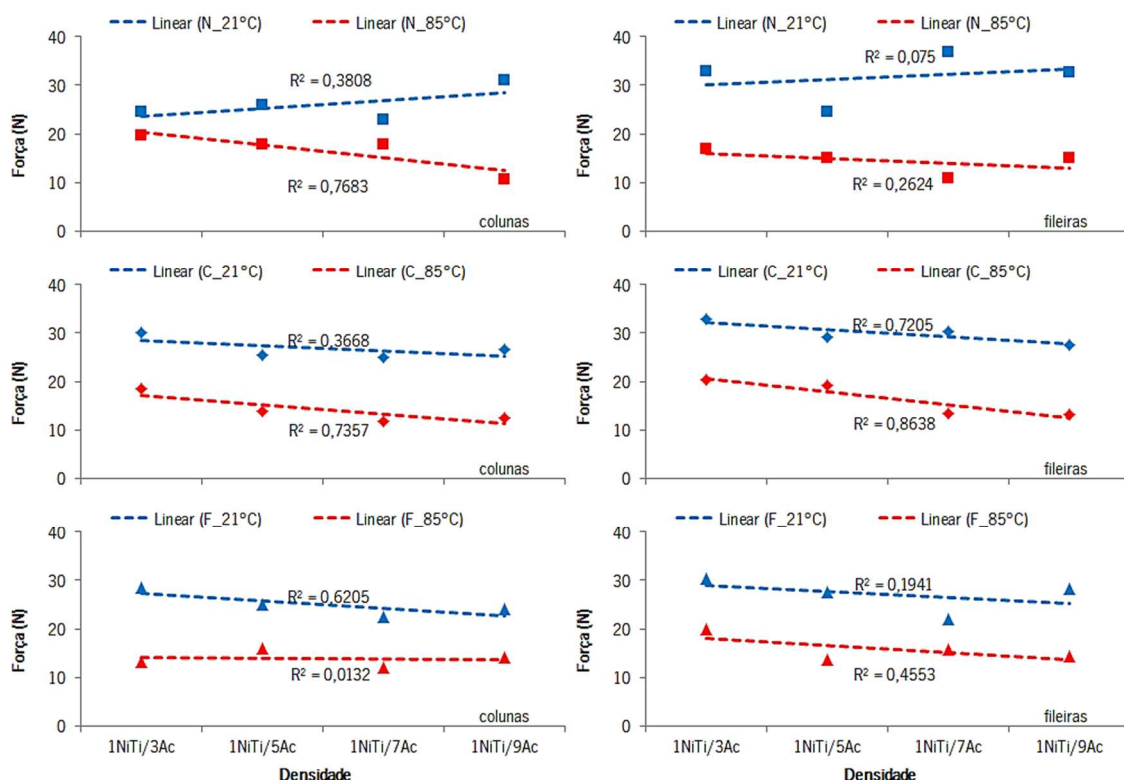


Figura 66 – Correlação linear do comportamento das malhas de trama sobre a temperatura quanto à força no sentido das colunas e das fileiras

As curvas traçadas acerca da correlação linear entre os diferentes tipos de estruturas em diferentes temperaturas mostraram que para os ensaios realizados no sentido das colunas a 21° C, a não existência de correlação forte entre as diferentes densidades de amostras estudadas.

Por outro lado, quando ensaiadas a 85° C, a Figura 66 mostra que houve uma forte correlação para as estruturas com laçadas normal e carregada, nas quais a força necessária para provocar o bloqueio das estruturas, diminuiu linearmente à medida que decresceu a densidade de NiTi nas amostras, evidenciando que os fios de NiTi contido nas amostras, responderam ao estímulo da temperatura, fazendo com que variasse o comportamento durante os ensaios.

No tocante às curvas relativas à correlação para os ensaios realizados no sentido das fileiras, mostradas na Figura 66, estas mostram claramente que apesar de ambas as formas de laçadas mostrarem uma notável redução na força necessária para provocar o bloqueio da estrutura à medida que elevou a temperatura dos ensaios para 85° C, somente as amostras com estruturas com laçadas carregadas apresentaram resultados lineares à medida que reduziu a densidade de fios de NiTi nas estruturas estudadas.

6.2.5. Conclusões

No final do estudo realizado acerca do comportamento de estruturas de malhas de trama com fios de memória de forma, nomeadamente o NiTi, algumas considerações são enumeradas de seguida.

As malhas contendo somente fios acrílicos na estrutura mostraram elevada extensão no sentido das fileiras e reduzida extensão no sentido das colunas. Por outro lado, à medida que foram adicionados fios metálicos de NiTi nas estruturas, houve uma mudança radical no comportamento das malhas, aumentado a extensão no sentido das colunas e reduzindo no sentido das fileiras, à medida que aumentou a densidade de NiTi.

Os estudos mostraram que a forma da laçada influencia fortemente o comportamento mecânico das estruturas de malha, tanto no que diz respeito à extensão, como à força necessária para provocar o bloqueio das estruturas. Dentre todas as formas de laçadas, a com estrutura de laçadas flutuante apresentou menor extensão quando ensaiadas no sentido das colunas e maior extensão quando ensaiadas no sentido das fileiras. Por outro lado, as estruturas com laçadas normal apresentaram maior extensão quando ensaiadas no sentido das colunas e menor quando ensaiadas no sentido das fileiras.

Quanto à força necessária para provocar o bloqueio das estruturas, as amostras em forma de laçada normal apresentaram maior resistência aos ensaios, enquanto que a laçada carregada foi a que apresentou menor força para a que a malha atingisse o ponto de bloqueio da estrutura.

Os estudos nos conduziram a concluir que o aumento na densidade de fios de NiTi nas amostras aumentam a extensão e reduzem a força necessária para atingir o bloqueio da estrutura quando ensaiadas no sentido das colunas. Por outro lado, houve uma pequena redução da extensão e da força quando ensaiadas no sentido das fileiras.

A partir dos estudos conduzidos, verificou-se que o tipo de laçada influenciou os resultados dos ensaios. Assim, as malhas com laçada normal foram as que apresentaram maior extensão no sentido das colunas e menor no sentido das fileiras. Por outro lado, as malhas com laçada carregada foram as que apresentaram menor resistência à tração necessária para a deformação estrutural das amostras e, conseqüentemente, o ponto de bloqueio das mesmas.

Os resultados mostraram que a temperatura influenciou fortemente o comportamento mecânico das malhas de trama, principalmente no tocante à força necessária para atingir o ponto de bloqueio das estruturas. Os resultados mostraram que à medida que aumentou a temperatura dos ensaios de 21° C para 85° C, houve uma considerável redução na força necessária para a total deformação estrutural das amostras. Tal comportamento atribui-se ao fato de os fios de NiTi constantes nas malhas de trama serem sensíveis à temperatura, e por estarem memorizados em forma linear, tenderem a voltar à forma previamente memorizadas, movimentando a estrutura de malha.

CAPÍTULO VII - Estudo da
influência dos materiais com
memória de forma e
elastômeros em estruturas de
malhas tubulares

7.1.Introdução

Este capítulo objetiva analisar a influência de fios de NiTi e elastômeros em estruturas de malhas tubulares, no que concerne à sua capacidade de compressão quando em presença de temperatura, correspondente à mudança de fase do NiTi. Previu-se que estruturas em forma tubular composta de fios elastoméricos em conjunto com fios de NiTi em diferentes densidades, quando postos em presença de calor, possam atuarem em conjunto, variando os valores de compressão.

Uma das aplicações de tubos de compressão é no tratamento de problemas de insuficiência venosa nos membros inferiores, onde se utiliza meias de compressão graduada. As meias de compressão auxiliam o sistema de válvulas venosas, através da compressão graduada, onde a compressão é mais acentuada no tornozelo e vai diminuindo até à coxa. Neste sentido, segundo Clark e Krimmel [144], a compressão está dividida em 4 classes, como se pode observar no Quadro 18, sendo que os valores apresentados neste quadro correspondem à compressão pretendida no tornozelo, o que corresponde a 100% da compressão.

Quadro 18 - Comparação da compressão requerida no tornozelo para as diferentes normas (adaptado de [144])

Norma		Inglesa BS 6612:1985	Francesa ASQUAL	Alemã RAL-GZ 387:2000
Método de ensaio		HATRA	IFTH	HOSY
Classe (mmHg)	I	14-17	t10-15	18-21
	II	18-24	15-20	23-32
	III	25-35	20-36	34-46
	IV	-	>36	>49

Segundo a norma BS 6612:1985 a compressão deverá diminuir gradualmente desde o tornozelo até a altura do joelho, e do joelho até ao cimo da coxa. Sendo requerido na norma que a compressão na altura do joelho seja entre 80-50% da compressão do tornozelo, enquanto que no cimo da coxa a compressão requerida deverá ser entre 30-20% da compressão do tornozelo. Neste sentido, ao estudar a capacidade de compressão de malha tubulares combinando fios de NiTi em combinação com fios de elastano e acrílico, espera-se que a capacidade de compressão varie na ordem dos 20% quando exposto à temperatura de 85° C (temperatura de transformação

do NiTi), de modo a facilitar a usabilidade da peça de vestuário antes da atuação da estrutura de compressão.

7.2.Planeamento de experiências

A fim de estudar as propriedades de compressão de malhas tubulares, foi inicialmente planeado e definido a produção de um conjunto amostras com diferentes configurações de densidade de fios de NiTi e elastômeros para que fossem ensaiadas tanto em temperatura ambiente de 21° C, como à temperatura de 85° C, correspondente à mudança de fase do material com memória de forma utilizado na estrutura, nomeadamente o NiTi. As configurações das amostras a serem confeccionadas encontram-se descritas no Quadro 19.

Quadro 19 - Fatores utilizados para planificação das experiências em malhas tubulares

Tipo de malha	Malha em forma tubular com 60 mm de diâmetro em laçada normal	
Fios base	Acrílico 60 tex (PAN) em conjunto com elastômero 285 dtex (EL)	
Fio com memória de forma	Fios de NiTi 127 µm	
Fileiras/cm	5	
Colunas/cm	5	
Configuração das amostras	a	1 fio de acrílico+1 fio de elastômero/1 fio de NiTi
	b	5 fios de acrílico+5 fios de elastômero/1 fio de NiTi
	c	10 fios de acrílico+10 fios de elastômero/1 fio de NiTi
	d	15 fios de acrílico+15 fios de elastômero/1 fio de NiTi
	e	1 fio de acrílico+1 fio de elastômero

7.3. Produção das amostras

As amostras de malha tubular com forma foram inicialmente produzidas num tear eletrónico industrial, utilizado para a fabricação de peúgas. O processo de tricotagem funcionou perfeitamente, no entanto, durante a troca do fio na máquina, o sistema de porta-fios funciona sob a forma de sucção a vácuo, sendo inadequado para fios metálicos rígidos, como é o caso do fio de NiTi utilizados.

Desta forma as amostras para ensaio foram produzidas usando um tear circular laboratorial (*Tricolab*) mostrado na Figura 67, o qual mostrou possuir excelente capacidade de tricotagem dos fios metálicos de NiTi utilizados no presente estudo.

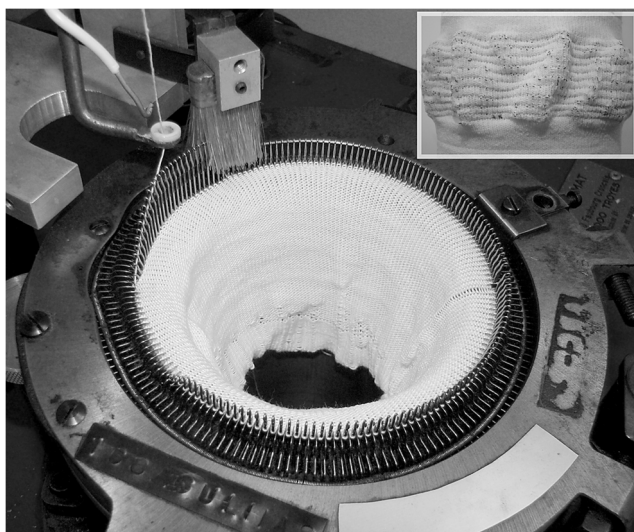


Figura 67 - Tricotagem em tear laboratorial “TricoLab”

Foram produzidas diversas amostras de malhas tubulares, entretanto, devido à simplicidade do equipamento, o qual não permite variações alargadas, tanto no comprimento como na altura das laçadas, fez com que a malha tubular produzida apresentasse densidades, tanto de colunas quanto de fileiras, muito altas, ocasionando laçadas com comprimento muito reduzido, as quais impediam a movimentação por parte dos fios de NiTi na estrutura quando fossem expostos a variações de temperatura, motivo pelo qual se procurou outra alternativa tecnológica.

Finalmente, levando em consideração às tentativas anteriores, e por outro lado, a experiência já adquirida quando da confecção de amostras durante o estudo sobre a energia dos fios em

diferentes tipos de laçadas, foi escolhido o tear retilíneo manual, com 8 agulhas/polegada, mostrado na Figura 68, para a confecção das amostras conforme os parâmetros definidos no planeamento anterior, mostrado no Quadro 19.

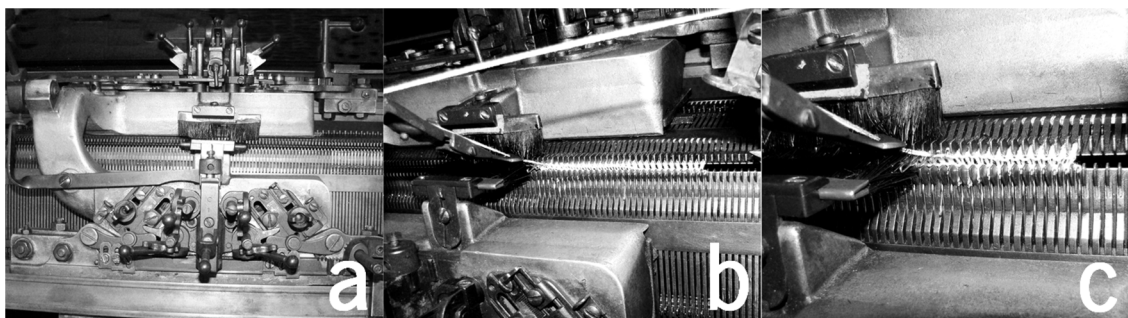


Figura 68 - Tricotagem em tear retilíneo manual

Para a confecção das amostras, foram utilizados como estrutura de base, fios de fibra acrílica de 60 tex juntamente com fios elastoméricos de 285 dtex, o qual apresentou melhores resultados aquando da análise da combinação de fios elastoméricos com fios de NiTi. E, como fio com efeito de memória de forma na estrutura, foram utilizados fios de NiTi com diâmetro de 127 μm .

As amostras produzidas apresentam-se na Figura 69: (a) 1 fileira de elastano e acrílico sobre 1 fileira de NiTi; (b) 5 fileiras de elastano e acrílico sobre 1 fileira de NiTi; (c) 10 fileiras de elastano e acrílico sobre 1 fileira de NiTi; (d) 15 fileiras de elastano e acrílico sobre 1 fileira de NiTi; (e) estrutura base de referência, contendo somente fileiras compostas por 1 fio de elastano e 1 fio de acrílico inseridos em conjunto. Todas as estruturas foram confeccionadas em laçadas normal, tanto a estrutura de base, quanto as fileiras contendo fios de NiTi.

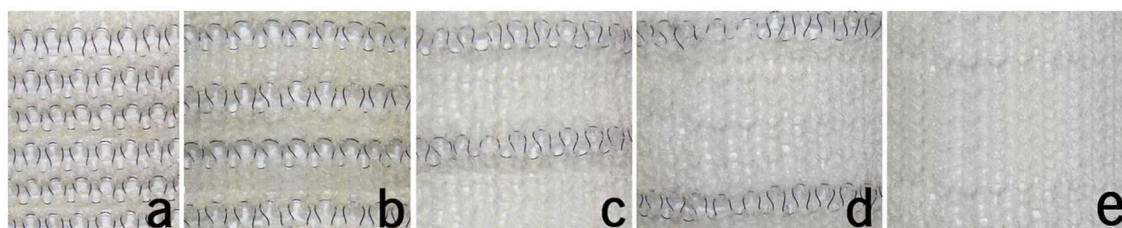


Figura 69 - Amostras produzidas no tear retilíneo com diferentes densidades de NiTi com acrílico e elastano.

7.4. Caracterização das malhas tubulares

Após a confecção das amostras de malha tubulares, estas foram caracterizadas, sendo que as respectivas propriedades dimensionais são apresentadas no Quadro 20.

Quadro 20 – Caracterização das malhas tubulares

Amostras	Fileiras/ cm	Colunas/ cm	Diâmetro (mm)	Altura da laçada (mm)		Comprimento da laçada (mm)
				PAN+EL	NiTi	
a) 1ELPAN/1NiTi	5,5	4,0	72	3,5	4,0	22
b) 5ELPAN/1NiTi	5,5	4,0	75			
c) 10ELPAN/1NiTi	5,0	4,5	68			
d) 15ELPAN/1NiTi	5,0	4,5	67			
e) ELPAN	4,5	5,0	65			

7.5. Ensaios de compressão das malhas tubulares com forma

Para a realização dos ensaios de compressão, foi utilizado o equipamento *Stocking Compression Tester – STM 579* da SATRA [145], mostrado na Figura 70, o qual faz uso da norma BS 6612:1985, referenciado tanto por Coull [146] como por Reid Jr [147], como sendo o melhor método normalizado para ensaios de compressão em meias.



Figura 70 - Aparelho para ensaio de compressão em meias. Equipamento STM579 (a); indicador de tensão (b)

O aparelho utilizado para a medição da compressão, mostrado na Figura 70, consiste de duas partes: (a) braço articulado em forma da perna humana, na qual a malha em forma tubular é vestida; e (b) cabeça de leitura da tensão da malha (*HATRA pressure tester*). Para realização de

ensaios de compressão de malhas, a malha é inserida no aparelho, simulando o vestir de uma meia numa perna humana. A cabeça de leitura é pressionada contra a malha esticada, em diferentes pontos ao longo da amostra (comprimento da perna), a qual apresenta um valor de tensão circunferencial da malha, que é convertido a fim de se obter um valor de pressão em mmHg.

Todos os diferentes tipos de malhas de forma produzidas, conforme descritas no Quadro 20 foram testadas seguindo as normas indicadas, num total de 5 repetições, tanto à temperatura de 21° C, como à 85° C, temperatura correspondente à mudança de fase martensite/austenite dos fios de NiTi utilizados nas amostras, objetivando estudar a influência dos materiais com memória de forma e elastômeros em estruturas de malhas tubulares quanto ao efeito de compressão, conforme mostrado na Figura 71.



Figura 71 - Ensaio de compressão utilizando o *Stocking Compression Tester – STM 579*

Todas as amostras de malhas tubulares produzidas foram ensaiadas em diferentes pontos, e anotados os valores de tensão fornecidos pela cabeça de leitura mostrados no indicador de tensão, conforme ilustrados na Figura 71a.

De acordo com Coull [146] e Reid Jr [147], os valores finais de compressão para as malhas tubulares estudadas, foram transformados para mmHg utilizando a Eq. 4 abaixo:

$$P = \frac{4t}{g}$$

Eq. 4 - Equação para medição da compressão

Onde:

P = tensão em mmHg;

T = tensão medida no medidor de tensão;

G = perímetro da amostra em cm.

7.6. Resultados e discussões

7.6.1. Capacidade de compressão das malhas tubulares

Após a realização dos ensaios de compressão das malhas tubulares, os valores fornecidos pela cabeça de leitura foram digitalizados e tratados de acordo com a Eq. 4.

Os valores finais de compressão para os ensaios realizados nas diferentes estruturas de malhas tubulares são apresentados no Quadro 21.

Quadro 21 – Valores de compressão para as estruturas de malha tubular

Amostras	Compressão 21° C	CV%	Compressão 85° C	CV%	Variação da compressão* (%)
a) 1ELPAN/1NiTi	6,83	8,97	6,65	10,82	-2,71%
b) 5ELPAN/1NiTi	6,68	10,93	6,57	11,73	-1,67%
c) 10ELPAN/1NiTi	6,51	10,98	6,43	12,17	-1,24%
d) 15ELPAN/1NiTi	6,03	15,75	5,50	14,35	-9,64%
e) ELPAN	5,99	8,52	-	-	-

*Variação da compressão (%) = $((C85 - C21) / C85) \times 100$

Os valores de compressão obtidos para os ensaios realizados a 85° C para as diferentes configurações de estruturas de malha tubulares estudadas, mostraram valores muito próximos àqueles obtidos para os ensaios realizados à temperatura de 21° C. Assim sendo, denota-se que a inserção de fios com memória de forma com este diâmetro nas estruturas estudadas, não resultaram em níveis compressão satisfatórios e esperados. De acordo com os dados, verificou-se que a variância na compressão das amostras à temperatura de 85° C, em comparação aos resultados a 21° C de modo geral, foi praticamente desprezível. Entretanto, as estruturas

compostas por 15 fileiras de elastano/acrílico e 1 fileira de NiTi, resultou em valores de compressão que sugerem estudos posteriores neste contexto.

Prevvia-se que as malhas tubulares produzidas com fios elastoméricos em combinação com diferentes densidades de fios de NiTi, à medida que fossem expostas à presença de calor, fizessem com que os fios de NiTi contidos na estrutura, por serem sensíveis à temperatura, tendessem a voltar à forma pré memorizada, movimentando a estrutura, aumentando ou diminuído a compressão da malha em forma tubular. Entretanto, os resultados obtidos, conduzem a sugerir que o fio de NiTi que se encontrava na estrutura não teve a força necessária para movimentar a estrutura base formada por um conjuntos de fios elastoméricos e acrílicos, contidos na estrutura da malha tubular.

Por outro lado, quando as estruturas estavam livres sob nenhum efeito de tensão estrutural, quando postos à presença de calor, ocorreu uma pequena variação da forma tubular da estrutura, provocada pela movimentação dos fios de NiTi que se encontravam no interior da estrutura tubular, a fim de adquirir sua forma previamente memorizada.

7.6.2. Efeito da densidade sobre os valores de compressão

Os resultados obtidos a cerca dos valores de compressão das malhas tubulares com densidades menores que 10 fios de elastano/acrílico sobre 1 fio de NiTi, conforme apresentados na Figura 72, demonstram que à temperatura de 85° C houve um pequeno acréscimo na compressão, em comparação aos ensaios realizados à temperatura de 21° C. Por outro lado, as amostras que continham a 15 fios de elastano/acrílico sobre 1 fio de NiTi em sua estrutura, apresentaram em presença de calor de 85° C, percentuais de compressão próximos a 10% quando em comparação aos ensaios realizados à temperatura de 21° C, demonstrando possibilidades de realização de possíveis trabalhos futuros neste contexto.

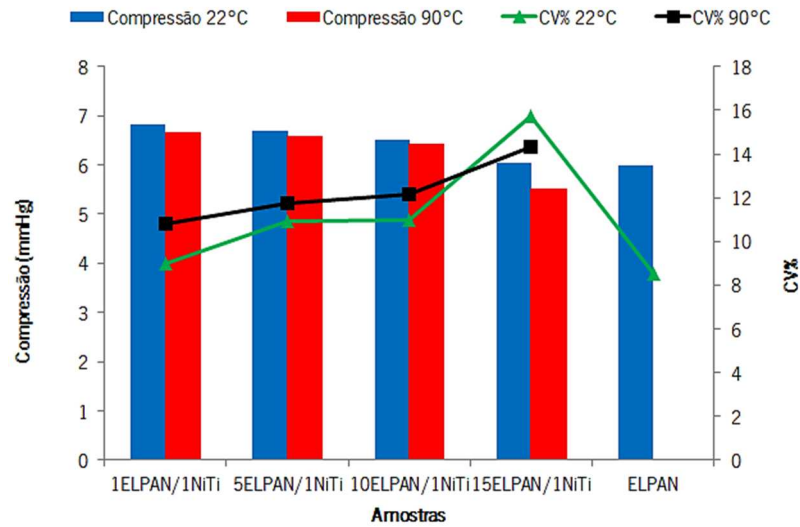


Figura 72 - Efeitos da densidade sobre a compressão em malha tubulares

Foram estudadas as possíveis correlações existentes entre as diferentes densidades das malhas tubulares e os respectivos valores de compressão obtidos, os quais são apresentados na Figura 73. As curvas mostram que existe uma correlação quase linear entre a densidade de fios de NiTi e os valores de compressão. Os resultados mostraram que nos ensaios conduzidos a 85° C, percebe-se que os valores de compressão diminuem linearmente à medida que aumenta a densidade de fios de NiTi na estrutura da malha tubular.

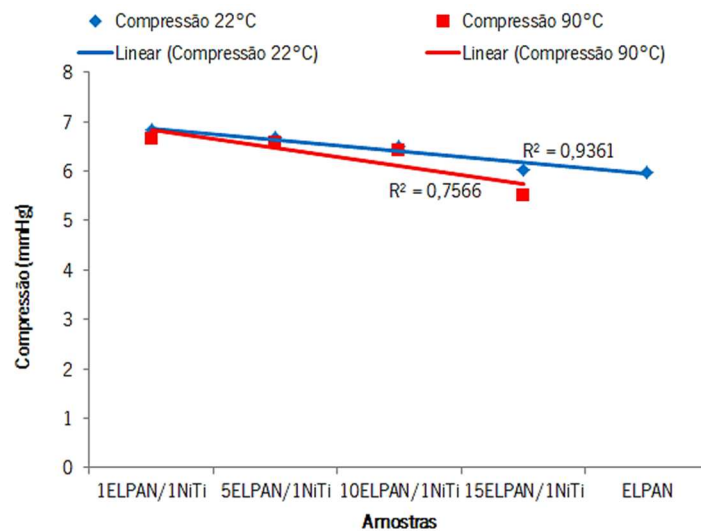


Figura 73 - Curvas de correlação entre a densidade das malhas tubulares e valores de compressão

Foi observado que, para todas as estruturas de malha tubulares estudadas, à medida que diminuiu a densidade de fios de NiTi, os valores de compressão sofreram um significativo

aumento no coeficiente de variação. Por outro lado, os ensaios realizados com as estruturas de base que não continham fios metálicos, apenas fios elastoméricos e acrílicos, apresentaram reduzido coeficiente de variação quando comparado com os demais, que possuíam fios metálicos de NiTi na estrutura. Tal comportamento é atribuído ao aumento na rigidez da malha tubular, provocado pelos fios de NiTi contidos na estrutura, os quais promovem um aumento da variabilidade dos resultados.

7.6.3. Efeito da temperatura na capacidade de compressão

As malhas tubulares produzidas com fios elastoméricos em combinação com diferentes densidades de fios de NiTi, sugerem que à medida que sejam expostas à presença de calor, façam com que os fios de NiTi contidos na estrutura, por serem sensíveis à temperatura, tendam a voltar à forma pré memorizada, movimentando a estrutura, aumentando ou reduzindo a compressão da malha em forma tubular. Entretanto, analisando os resultados apresentados na Figura 72, bem como na Figura 73, verifica-se que a temperatura influenciou os resultados dos ensaios, reduzindo os valores de compressão das malhas tubulares. Por outro lado, os fios de NiTi contidos na estrutura não mostrou possuir força necessária para movimentar o restante da estrutura composta por fios elastoméricos e de fibra acrílica.

7.7. Conclusões

Ao final do estudo a cerca da influência dos materiais com memória de forma e elastômeros em estruturas de malhas tubulares, algumas considerações importantes podem ser destacadas.

O tear eletrônico industrial, utilizado para a fabricação de peúgas, mostrou possuir excelente capacidade de tricotagem para fios de NiTi de 127 μm , naquelas situações em que não sejam necessárias trocas de fios, visto que o sistema de guia-fios, por funcionar por sistema de sucção à vácuo, não é indicado para fios metálicos rígidos.

O tear circular laboratorial (*Tricolab*), apesar de possuir boa capacidade de tricotagem para os materiais utilizados nesta pesquisa, mostrou-se inadequado devido às suas limitações, no que diz respeito à capacidade de variação, tanto ao tipo, como à altura das laçadas.

O tear retilíneo mostrou ser o equipamento ideal para a produção de malhas tubulares, naquelas situações onde requer variações tanto na forma, na altura e no comprimento das laçadas, bem como onde necessite utilizar tipos de fios diferentes.

Previu-se que os fios elastoméricos contidos na estrutura, por possuírem excelentes propriedades elásticas, promovessem uma tensão na estrutura tubular, atuando em conjunto com os fios de NiTi no intuito de aumentar ou diminuir os valores de compressão da malha tubular, entretanto, os resultados de compressão obtidos nos estudos, apesar de apresentarem alguma variabilidade nos resultados em presença de calor, quando ensaiado a 85° C, não foram suficientes para mover o restante da estrutura, ao ponto de atingir valores de compressão inicialmente esperados, acima de 20%. Estes resultados levaram a concluir que o fio de NiTi que se encontrava na estrutura não teve a força necessária para movimentar a estrutura base formada por um conjuntos de fios elastoméricos e acrílicos, contidos na estrutura da malha tubular.

CAPÍTULO VIII - Conclusões

8.1.Considerações finais

Este trabalho de doutoramento teve como foco principal alargar as fronteiras do conhecimento acerca do comportamento de estruturas fibrosas dinâmicas, utilizando materiais com memória de forma e elastómeros.

Após uma profunda pesquisa a cerca do conhecimento que tem sido gerado nesta área, através da pesquisa em livros, revistas e meios eletrónicos em geral, percebemos a incipiente difusão do conhecimento neste campo, o que nos encorajou e conduziu-nos a perceber a importância e necessidade de se aprofundar os conhecimentos neste campo do domínio.

Concluimos que os materiais com memória de forma à base de NiTi, apesar do elevado preço e de possuir um estreito leque de gradientes de temperatura de transformação, ainda estão sendo largamente utilizadas em aplicações nas quais poderiam utilizar-se dos polímeros com memória de forma. Situações ocorrem principalmente nas áreas têxtil e do design, onde os polímeros com memória de forma seriam mais indicados, por apresentarem um vasto leque de temperaturas de transformação e baixo custo de produção, além de apresentarem excelentes propriedades de maleabilidade e flexibilidade, e baixa rigidez, que são parâmetros essenciais para uma boa tricotabilidade.

Chegamos a conclusão que as pesquisas realizadas na área têxtil, utilizando materiais com memória de forma, têm sido direcionados principalmente à área do design, onde a aplicação destes materiais dão “vida” ao tecido, a partir de determinado estímulo exterior ao meio onde se encontra envolvido. Por outro lado, nos deparamos com a praticamente inexistência de geração de conhecimento a cerca do comportamento das estruturas têxteis quando incorporadas materiais com memória de forma em sua estrutura, o que nos conduziu a buscar alargar as fronteiras do conhecimento nesta área. Neste contexto, este trabalho de doutoramento pretende igualmente contribuir para alargar as fronteiras do conhecimento acerca do comportamento das estruturas fibrosas utilizando materiais com memória de forma e elastómeros.

Importantes conclusões foram enumeradas quanto ao estudo da tricotabilidade dos fios de NiTi, os quais constatamos que o atrito, flexão e resistência dos fios, são propriedades que estão

diretamente ligadas à capacidade de tricotabilidade dos fios em equipamentos têxteis convencionais. Por meio dos estudos experimentais, concluímos que o método de análise de atrito em fios desenvolvidos por Buckle e Pollitt não é adequado para fios metálicos de NiTi, o que conduziu ao desenvolvimento de um novo sistema que foi acoplado ao dinamômetro e nos forneceu resultados satisfatórios a cerca do atrito dos fios de NiTi. Ensaio em fios de NiTi com 127 µm de diâmetro, apresentaram um coeficiente de atrito em superfícies cerâmicas de 0,18 e em aço inox de 0,14, indicando situarem na mesma faixa dos demais fios têxteis que oferecem boa tricotabilidade [132].

Concluímos ainda em estudos a cerca da tricotabilidade, que os fios de NiTi apesar de possuir boas propriedades de atrito, apresentaram módulo de resistência e histerese à flexão muitíssimo elevado, conduzindo-os a apresentarem maior dificuldade em ser fletido pelos elementos tricotadores durante a formação das laçadas, ocasionando a ruptura tanto por parte do fio, quanto possivelmente das agulhas durante o processo de tricotagem.

Conclui-se igualmente com este trabalho que os fios de NiTi apresentam baixa capacidade de tricotabilidade devido a apresentarem alta resistência à tração, baixo alongamento à rotura e pequena zona elástica, o que os tornam praticamente incapazes de suportar aos picos de tensão durante o processo de tricotagem.

Os estudos concluíram igualmente que o fio de NiTi de 50 µm de diâmetro possui pouca energia disponível para realização de trabalho, especialmente quando incorporado com outros materiais em estruturas têxteis. Também durante o processo de produção das amostras, foi constatada a fragilidade neste fio quanto a suportar os picos de tensão durante o processo de formação das laçadas fazendo com que o mesmo rebentasse inúmeras vezes.

Estudos nos conduziram a afirmar que o fio de NiTi de 210 µm apresentou variabilidade quanto a energia disponível de acordo com a forma da laçada no qual estava deformado, especialmente aqueles memorizados em forma de laçada carregada, que mostraram possuir considerável energia disponível para movimentação de estruturas. Entretanto, foi constatado durante a produção das amostras, que este fio de NiTi é bastante rígido para a tricotagem em máquinas convencionais, fenómeno já evidenciado em estudos realizados por Winchester e Stylios [91], que concluíram que o limite mais apropriado está entre 100 e 200 µm de diâmetro.

Dentre os diferentes tipos de fios e formas de laçadas estudadas, concluímos que o fio de NiTi de 127 μm apesar de possuir menor energia disponível quando em comparação ao fio de 210 μm , foi o que apresentou melhor capacidade de tricotabilidade, e considerável energia disponível para mover a estrutura, principalmente quando memorizado em forma de laçada carregada.

Quanto à influência dos elastanos em conjunto com fios de NiTi, foi observado que o fio metálico de NiTi, tende a reagir à presença de temperatura movendo o conjunto em sentido contrário aos fios de elastano, que por sua vez, apresentaram efeito contrário à força provocada pelos fios de NiTi. Os resultados mostraram que à medida que crescem, tanto a massa linear, como a quantidade de fios elastoméricos nas amostras, o fio de NiTi contido na estrutura reduz a sua influência sobre o comportamento do conjunto.

Os estudos realizados levaram a concluir que a combinação de fios de NiTi em forma de laçadas carregadas combinados com fios elastoméricos de 285 dtex, quando expostos à 85° C, correspondente à transformação martensítica, reduzem tanto a força necessária para que ocorresse a deformação, como no alongamento no instante em que a deformação fosse desfeita por completo. Os resultados conduziram a concluir que a melhor combinação entre fios de NiTi e fios elastoméricos, no sentido de promover um comportamento dinâmico, às temperaturas ambiente e de transformação martensítica do NiTi, foi obtida pela combinação onde havia apenas 1 fio de elastano, com massa linear de 285 dtex, em combinação com fio de NiTi de 127 μm deformado em forma de laçada carregada.

Os estudos acerca da variação da densidade de fios de NiTi em malhas de trama mostraram uma ligeira variação no tocante ao ponto de bloqueio da estrutura, demonstrando que o aumento na densidade de fios de NiTi nas amostras, aumenta a extensão e reduz a força necessária para atingir o bloqueio da estrutura, quando ensaiado no sentido das colunas. Por outro lado, no sentido das fileiras, há uma redução da extensão e da força necessária para atingir o ponto de bloqueio da estrutura.

Estudos evidenciaram que a temperatura influencia fortemente o comportamento mecânico das malhas de trama, principalmente no tocante à força necessária para atingir o ponto de bloqueio das estruturas. Verificou-se que na mudança a temperatura dos ensaios de 21° C para 85° C, provocou uma considerável redução na força necessária para a total deformação estrutural das

amostras. Tal comportamento atribui-se ao fio de NiTi constante nas malhas de trama que por serem sensíveis à temperatura, e por estarem memorizados na forma linear, tendem a voltar à forma previamente memorizadas, movimentando a estrutura de malha.

Os estudos acerca da combinação de fios metálicos com memória de forma com elastômeros para produção de malhas tubulares dinâmicas, a fim de que se variasse o seu comportamento mecânico, especialmente de compressão, quando na presença de temperatura, não mostrou resultados satisfatórios e esperados, evidenciando que o fio de NiTi contido na estrutura de malha tubular, não dispôs de força suficiente para mover a restante estrutura de malha, composta por fios de elastano. Tal comportamento foi já evidenciado durante o estudo da combinação de fios de NiTi com fios elastoméricos, nos quais os resultados mostraram que 1 fio de NiTi não possuía força suficiente para mover mais do que 2 fios de elastano.

8.2. Perspectivas futuras

Entendemos que com o aprofundamento desta pesquisa, no âmbito de alargar as fronteiras do conhecimento sobre as estruturas têxteis utilizando materiais com memória de forma, conduzem a uma série de estudos e perspectivas a serem futuramente desenvolvidos:

Estudar a aplicação de polímeros com memória de forma em combinação com fios elastoméricos na produção de estruturas têxteis dinâmicas;

Estudo a cerca da aplicação de materiais com memória de forma em estruturas tridimensionais;

Estudar o recobrimento de fios metálicos com memória de forma, objetivando melhorar a processabilidade destes materiais;

Estudo dos materiais com memória de forma em estruturas de malha tipo sanduíche;

Estudo da possibilidade de desenvolvimento de estruturas auxéticas utilizando materiais com memória de forma.

Bibliografia

- [1] M. C. B. C. Ribeiro, *et al.*, "Qualidade, Conforto e Estética na Moda Praia.," in *V Congresso Internacional de Estudos em Design*, Bauru, SP, Brasil, 2009.
- [2] R. A. Sanches, *et al.*, "Proposta de Metodologia para Seleção de Matérias-Primas Utilizadas em Artigos para Vestuário.," in *5 Congresso Internacional de Pesquisa em Design*, Bauru, SP, Brasil., 2009.
- [3] C. M. F. Dias, "Design de Estruturas Fibrosas Híbridas para Aplicação Técnica," Mestrado, Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2009.
- [4] R. Figueiro, "Optimização do Desenvolvimento de Preformas em Malha de Trama para Materiais Compósitos.," Doutorado, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2002.
- [5] M. Mohamed, "Recent Advances in 3D Weaving.," presented at the First World Conference on 3D Fabric and Their Applications., Weston Conference Centre, University of Manchester, 2008.
- [6] N. Khokar, "Second-Generation Woven Profiled 3D Fabrics from 3D Weaving.," presented at the First World Conference on 3D Fabrics and Their Applications, Weston Conference Centre, University of Manchester, 2008.
- [7] A. Busgen and Y. Kastner, "Three-Dimensionally Woven Hollow Bodies for Material Reinforcement," presented at the Techtextil 2003 symposium: line up of international speakers features papers on trends in technical textiles, Frankfurt, Germany, 2003.
- [8] S. Yoo, *et al.*, "Application of a NiTi Alloy Two-Way Shape Memory Helical Coil for a Versatile Insulating Jacket.," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 481–482, pp. 662-667, 2008.
- [9] M. d. Araujo, "Têxteis Técnicos Parte 1: Estrutura e propriedades dos materiais têxteis para aplicações técnicas (fibras, fios, tecidos, malhas, entrançados e não tecidos)," in *Têxteis Técnicos*, ed. Guimarães: FMRG - Universidade do Minho, 2011, p. 375.
- [10] M. d. Araujo, *et al.*, *Têxteis Técnicos: Materiais do novo milénio. Vol I.* vol. 1. Braga: Ed. Williams, Lda, Ministério da economia, 2000.
- [11] S. Adanur, *Handbook of Industrial Textiles*. Tecnomc Publishing, Inc, 1995.
- [12] L. Ciobanu, "Development of 3D Knitted Fabrics for Advanced Composite Materials," in *Composite Materials - Ecodesign and Analysis*, B. Attaf, Ed., ed: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-composite-materials-ecodesign-and-analysis/development-of-3d-knitted-fabrics-for-advanced-composite-materials>, 2011.
- [13] J. Rupp. (2012, 14/01/2013) Nonwoven and Warp-Knitted Constructions are Being used more and more for a Range of Geotextile Applications. *Geotextiles: Functions & Fabric Constructions*.

- [14] H. O'Dell. (2008) Textiles Benefit Medical Industry - Flexibility, strength and adaptability are bringing textiles to the forefront of patient care, and concerns about safety are inspiring use beyond the hospital. *Specialty Fabrics Review*.
- [15] C. Rotsch, *et al.*, "Intelligent Textiles and Trends.," in *Springer Handbook of Medical Technology*, R. Kramme, *et al.*, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1321-1336.
- [16] M. Nichifor, *et al.*, "New Multifunctional Textile Biomaterials for the Treatment of Leg Venous Insufficiency.," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 20, pp. 975-982, 2009/04/01 2009.
- [17] M. d. Araujo, *et al.*, *Têxteis Técnicos: Materiais do novo milénio. Vol II.* vol. 2. Braga: Ed. Williams, Lda, Ministério da economia, 2001.
- [18] M. d. Araujo, *et al.*, *Têxteis Técnicos: Materiais do novo milénio. Vol III* vol. 3. Braga: Ed. Williams, Lda, Ministério da economia, 2001.
- [19] L. Rambausek and L. V. Langenhove, "A Snapshot of Smart Textiles in Military Applications.," presented at the NATO ASI "Defense related intelligent textiles and clothing for ballistic and NBC (nuclear, biological, chemical) protection.", Split, Croatia, 2010.
- [20] E. Sparks, *Advances in Military Textiles and Personal Equipment.*: Woodhead Publishing, 2012.
- [21] A. Catarino, *et al.*, "Integration of Biosignal Monitoring in Sports Clothing," in *Fibrenamics Conference*, ed. Guimarães, 2012.
- [22] R. Figueiro, *et al.*, "Aplicação de Materiais Fibrosos na Área Militar.," presented at the ICEUBI2011 - International Conference on Engineering UBI, Universidade Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2011.
- [23] Wikipédia. (2009, 23/01/2013). *Têxtil Técnico - Estruturas Têxteis Utilizadas nos Têxteis Técnicos*. Available: http://pt.wikipedia.org/wiki/T%C3%AAxtil_t%C3%A9cnico#Estruturas_utilizadas_nos_t.C3.AAxteis_t.C3.A9cnicos.
- [24] M. d. Araujo and E. M. M. Castro, *Manual de Engenharia Têxtil I, Vol. I.*: Fund. Calouste Gulbenkian, 1984.
- [25] M. d. Araujo and M. Castro, *Manual de Engenharia Têxtil, Vol. II.*, 1986.
- [26] J. Hu, *3-D Fibrous Assemblies: Properties, applications and modelling of three-dimensional textile structures.*: Woodhead Publishing, 2008.
- [27] H. Gu, "Comparison Between Laminated and Integrated Glass Fibre Reinforced Plastics.," *Materials & Design*, vol. 21, pp. 461-464, 2000.
- [28] K. H. Tsai, *et al.*, "Fatigue Behavior of 3D Multi-Layer Angle Interlock Woven Composite Plates.," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- [29] P. Brock, "3D: Jacquard Woven," <http://www.theweaveshed.org/447/philippa-brock-2d-3d-jacquard-woven-textiles-exhibition-montreal/>, Ed., ed. Montreal: Trames Gallery of Montreal Centre for Contemporary Textiles, 2012.

-
- [30] D. Mycroft, "Ten Ways Technology Changed The Outdoors.," <http://www.outdoorsmagic.com/outdoor-features/ten-ways-technology-changed-the-outdoors/6180.html>, Ed., ed, 2009.
 - [31] Gore-Tex, "Schematic diagram of composite Gore-Tex fabric," vol. 497 × 379 pixels, *Goretex_schema-en.png*, Ed., ed: Gore-Tex, 2006.
 - [32] B. Textile, "3D Spacer Fabrics," vol. 600 × 329 pixels, *beyzan-spacer1.jpg*, Ed., ed. Turkey, 2011.
 - [33] R. Philpott and K. Gaudion, "Structural Textiles: Adaptable form and surface," vol. 670 × 420 pixels, *anglesbetweenCurves_research3*, Ed., ed. London, 2011.
 - [34] P. G. Unal, "3D Woven Fabrics," in *Woven Fabrics*, H.-Y. Jeon, Ed., ed: <http://www.intechopen.com/books/woven-fabrics/3-d-woven-fabrics>, 2012.
 - [35] M. Flajjole. (2012, 23/04). *Tecidos com memória de forma e suas aplicações na área Têxtil e do Vestuário*. Available: <http://www.flajjolemalhas.com.br/site/content/noticias/detalhes.php?noticia=6>.
 - [36] A. M. Torki, *et al.*, "The Viscoelastic Properties of Modified Thermoplastic Impregnated Multiaxial Aramid Fabrics.," *Polymer Composites*, vol. 33, pp. 158-168, 2012.
 - [37] F. Steffens and R. Fangueiro. (2012) *Materiais Auxéticos – O Efeito do coeficiente de Poisson negativo*. REDIGE. 40.
 - [38] H. Hu, *et al.*, "Development of Auxetic Fabrics Using Flat Knitting Technology.," *Textile Research Journal*, vol. 81, pp. 1493-1502, 2011.
 - [39] D. G. Cicala, *et al.* (2009, 2009) *Polimeri a Comportamento Auxetico: Un innovazione o un evoluzione naturale? Join AiM. Adesione All'AiM*. 13.
 - [40] A. Alderson. (2011, 23/01/2013). *Smart Solutions from Auxetic Materials*.
 - [41] K. Alderson, *et al.*, "Auxetic Warp Knit Textile Structures," *physica status solidi (b)*, vol. 249, pp. 1322-1329, 2012.
 - [42] L. Chen, *et al.*, "Auxetic Materials with Large Negative Poisson's Ratios Based on Highly Oriented Carbon Nanotube Structures.," *Applied Physics Letters*, vol. 94, p. 253111, 2009.
 - [43] I. I. Argatov, *et al.*, "On Local Indentation and Impact Compliance of Isotropic Auxetic Materials from the Continuum Mechanics Viewpoint," *International Journal of Engineering Science*, vol. 54, pp. 42-57, 2012.
 - [44] X. Tao, *Smart Fibres, Fabrics and Clothing: Fundamentals and applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2001.
 - [45] T. L. Vigo, "Intelligent Fibrous Materials.," *Journal of textile institute*, vol. 90, p. 13, 1999.
 - [46] E. Bonnot, *et al.*, "Learning Through Cycling in Martensitic Phase Transitions," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 481–482, pp. 223-226, 2008.
 - [47] K. Nurveren, *et al.*, "Evolution of Transformation Characteristics with Heating/Cooling Rate in NiTi Shape Memory Alloys.," *Journal of materials processing technology*, vol. 196, pp. 129-134, 2008.

- [48] Z. Zhong and C. Yeong, "Development of a Gripper using SMA Wire.," *Sensors and Actuators A*, vol. 126, pp. 375-381, 2006.
- [49] F. Auricchio, *et al.*, "Shape-Memory Alloys: Macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 146, pp. 281-312, 1997.
- [50] S. Mizushima and H. Kosugi, "Process for Producing Curl Shrunk Silk Yarn.," US Patent 4 141 207, 1979.
- [51] Toray-Industries, "Spiro-Oxazine Compounds and Preparation Thereof and Photochromic Shaped Article.," 1988.
- [52] T. Hongu and G. O. Phillips, "New Fibers." vol. 66, E. Horwood, Ed., ed New York, 1990, p. 126.
- [53] A. S. Hoffman, " Intelligent Polymers (in Medicine and Biotechnology)," *Polymeric Materials Encyclopedia*, CRC Press, Boca Raton. FL, USA, vol. 5, 1996.
- [54] Y. Vili, "Investigating Smart Textiles Based on Shape Memory Materials.," *Textile Research Journal*, pp. 290-300, 2007.
- [55] J. Sepúlveda, *et al.*, "Steel Beam–Column Connection using Copper-Based Shape Memory Alloy Dampers.," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, pp. 429-435, 2008.
- [56] T. Laschuk, "Aplicação de Têxteis Inteligentes a Produtos de Design de Moda.," Mestrado, Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2008.
- [57] T. Laschuk and P. Souto, "Incorporation of SMA Technologies in Fashion Underwear Apparel.," presented at the International Scientific Conference in the Ambience Series, Borås, Sweden, 2008.
- [58] E. Patoor, *et al.*, "Shape Memory Alloys. Part I: General properties and modeling of single crystals.," *Mechanics of Materials*, vol. 38, pp. 391-429, 2006.
- [59] G. Dumont and C. Kühn, "Finite Element Simulation for Design Optimization of Shape Memory Alloy Spring Actuators.," *Engineering Computations*, vol. 22, pp. 835-848, 2005.
- [60] W. J. Buehler and F. E. Wang, "A Summary of Recent Research on the Nitinol Alloys and Their Potential Application in Ocean Engineering.," *Ocean Engineering*, vol. 1, pp. 105-120, 1967.
- [61] J. Hu, *Shape Memory Polymers and Textiles*. vol. 1: Woodhead Publishing, 2007.
- [62] W. Zaki and Z. Mourni, "A 3D Model of the Cyclic Thermomechanical Behavior of Shape Memory Alloys.," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 55, pp. 2427-2454, 2007.
- [63] M. Honkala, "Introduction to Shape Memory Materials.," in *Intelligent textiles and clothing*, H. Mattila, Ed., ed Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2006, p. 528.
- [64] T. Hesse, "Temperature Hysteresis in Shape-Memory Alloys," vol. 339x255 pixels, RTEmagicC_hysteresis_01.jpg, Ed., ed: <http://mb.uni-paderborn.de/en/mud/research/piezoelectric-and-ultrasonic-systems/shape-memory-actuators/>, 2013.

-
- [65] M. H. Wu and L. M. Schetky, "Industrial Applications for Shape Memory Alloys.," in *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, Pacific Grove, California, USA, 2000, pp. 171-182.
- [66] M. M. GmBH. (2010). *Memory Metalle Info Sheet*. Available: www.memory-metalle.de.
- [67] S. Lombardi and P. Poncet, "Metallurgical principles of Nitinol and its use in interventional devices," *Controversies and Consensus in Imaging and Intervention*, pp. 24-26, 2004.
- [68] M.-M. GmbH, "The memory effects - an introduction - Info Sheet No. 5," MM_05_introduction_e.pdf, Ed., ed. Germany: Memory-Metalle GmbH, 2010.
- [69] F. Boussu and J. L. Petiniot, "Development of Shape Memory Alloy Fabrics for Damping and Shape Control of Composite Structures", in *2nd AUTEX World Textile Conference, Textile Engineering at the Dawn of a New Millenium : An Exciting Challenge*, Bruges, Belgium, 2002, p. 7.
- [70] K. Otsuka and X. Ren, "Physical Metallurgy of Ti–Ni-Based Shape Memory Alloys.," *Progress in Materials Science*, vol. 50, pp. 511-678, 2005.
- [71] T. Maeshima, *et al.*, "Effect of Heat Treatment on Shape Memory Effect and Superelasticity in Ti-Mo-Sn Alloys.," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 438-440, pp. 844-847, 2006.
- [72] W. Buehler and W. Cross, "Nitinol-unique wire alloy with a memory," *Wire Journal*, vol. 2, p. 41, 1969.
- [73] L. Machado and M. Savi, "Medical Applications of Shape Memory Alloys.," *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, vol. 36, pp. 683-691, 2003.
- [74] D. Mantovani, "Shape Memory Alloys: Properties and biomedical applications.," *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, vol. 52, pp. 36-44, 2000.
- [75] D. Stöckel, "Industrial Applications of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys," in *ESOMAT 1989-1st European Symposium on Martensitic Transformations in Science and Technology*, 1989, pp. 223-230.
- [76] S. Saadat, *et al.*, "An Overview of Vibration and Seismic Applications of NiTi Shape Memory Alloy.," *Smart Materials and Structures*, vol. 11, p. 218, 2002.
- [77] C. Rice, "Shape Memory Alloys, Applications.," *Encyclopedia of Smart Materials*, 2002.
- [78] A. Biesiekierski, *et al.*, "A New Look at Biomedical Ti-Based Shape Memory Alloys," *Acta biomaterialia*, 2012.
- [79] M. Sreekumar, *et al.*, "Critical Review of Current Trends in Shape Memory Alloy Actuators for Intelligent Robots.," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 34, pp. 285-294, 2007.
- [80] L. Petrini and F. Migliavacca, "Biomedical Applications of Shape Memory Alloys.," *Journal of Metallurgy*, vol. vol. 2011, p. 15, 2011.
- [81] D. Stoeckel, "Shape Memory Actuators for Automotive Applications.," *Materials & Design*, vol. 11, pp. 302-307, 1990.

- [82] L. Van Langenhove and C. Hertleer, "Smart Clothing: A new life.," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 16, pp. 63-72, 2004.
- [83] G. K. Stylios, "Engineering Textile and Clothing Aesthetics using Shape Changing Materials.," in *Intelligent textiles and clothing*. vol. 54, H. Mattila, Ed., ed Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2006, p. 528.
- [84] T. Laschuk, *et al.*, "Nanotechnologies as Improvement of Fashion Textile Design.," in *4th International Textile, Clothing & Design Conference*, Dubrovnik, 2008, p. 6p.
- [85] Y. Zhu, "Shape Memory Textiles.," in *Shape Memory Polymers and Textiles*. vol. 1, J. Hu, Ed., ed Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2007, pp. 305-337.
- [86] D. Joly and J. L. Petiniot, "Etude de l'effet Amortissant de Fils d'AMF dans des Pouters en Composite Verreépoxy.," in *Intelligent Textiles and Clothing*. vol. 54, H. Mattila, Ed., ed Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2006, p. 528.
- [87] D. Congalton, "Shape Memory Alloys for Use in Thermally Activated Clothing, Protection Against Flame and Heat.," *Fire and Materials*, vol. 23, pp. 223-226, 1999.
- [88] E. Villa, *et al.*, "Mechanical analysis of hybrid textile composites with NiTi wires," *Journal of materials engineering and performance*, vol. 18, pp. 517-521, 2009.
- [89] N. T. Villa and R. Fanguero, "Design of Hybrid Braided Stents," presented at the 4th International Technical Textiles Congress, Istambul - Turkey, 2010.
- [90] S.-I. Vasile, *et al.*, "Analysis of hybrid woven fabrics with shape memory alloys wires embedded," *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 18, pp. 64-69, 2010.
- [91] R. Winchester and G. K. Stylios, "Designing Knitted Apparel by Engineering the Attributes of Shape Memory Alloy.," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 15, pp. 359-366, 2003.
- [92] A. Wasler, "Controllable Surface Area Fabric.," USA Patent, 2007.
- [93] CrunchWear, "Auto Snug Clothing.," 1, Ed., ed, 2007.
- [94] CorpoNove, "Wrinkle-Free Shirt," vol. 260x320 pixels, ed: John B. Carnett / Popular Science - Best Inventions of 2001, 2001.
- [95] S. Clowes. (2001, 03/10/2011). Smart Shirt Rolls up its Sleeves. *BBC News*, 1.
- [96] A. Lendlein and S. Kelch, "Shape Memory Polymers.," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 41, pp. 2034-2057, 2002.
- [97] M. L. Anthamatten, *et al.*, "Shape Memory Polymers," ed: Google Patents, 2012.
- [98] K. K. Julich-Gruner, *et al.*, "Recent Trends in the Chemistry of Shape Memory Polymers.," *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2012.
- [99] M. Yoonessi and R. A. Weiss, "High-Temperature Shape Memory Polymers.," 2012.
- [100] Q. Zhao, *et al.*, "Shape-Memory Polymers with Multiple Transitions: Complex actively moving polymers.," *Soft Matter*, vol. 9, pp. 1744-1755, 2013.
- [101] A. Lendlein, *Shape-Memory Polymers*. vol. 226: Springer, 2010.
- [102] C. Yakacki and K. Gall, "Shape-Memory Polymers for Biomedical Applications.," *Shape-Memory Polymers*, pp. 147-175, 2010.

- [103] P. Mather, *et al.*, "Shape Memory Polymer Research.," *Annual Review of Material Research Journal*, vol. 39, pp. 445-471, 2009.
- [104] I. S. Gunes, *et al.*, "Effect of Thermal Expansion on Shape Memory Behavior of Polyurethane and its Nanocomposites.," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 46, pp. 1437-1449, 2008.
- [105] L. Xu, *et al.*, "Investigation on Structures and Properties of Shape Memory Polyurethane/Silica Nanocomposites.," *Chinese Journal of Chemistry*, vol. 29, pp. 703-710, 2011.
- [106] M. Tian and T. Venkatesh, "Indentation of Shape Memory Polymers: Characterization of thermomechanical and shape recovery properties.," *Polymer*, vol. 54, pp. 1405-1414, 2013.
- [107] Q. Meng and J. Hu, "Self-Organizing Alignment of Carbon Nanotube in Shape Memory Segmented Fiber Prepared by in Situ Polymerization and Melt Spinning.," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, pp. 314-321, 2008.
- [108] A. A. Mamedov, *et al.*, "Molecular Design of Strong Single-Wall Carbon Nanotube/Polyelectrolyte Multilayer Composites.," *Nature Materials*, vol. 1, pp. 190-194, 2002.
- [109] J. H. Rouse and P. T. Lillehei, "Electrostatic assembly of Polymer/Single Walled Carbon Nanotube Multilayer Films.," *Nano Letters*, vol. 3, pp. 59-62, 2003.
- [110] N. A. Kotov, *et al.*, "Nanocomposites, Layer by Layer Assembly.," in *Encyclopedia Of Polymer Science and Technology*, ed, 2009.
- [111] P. T. Hammond, "Form and Function in Multilayer Assembly: New applications at the nanoscale.," *Advanced Materials*, vol. 16, pp. 1271-1293, 2004.
- [112] H. Zhao and H. Ju, "Multilayer Membranes for Glucose Biosensing via Layer-by-Layer Assembly of Multiwall Carbon Nanotubes and Glucose Oxidase.," *Analytical biochemistry*, vol. 350, pp. 138-144, 2006.
- [113] N. G. Sahoo, *et al.*, "Polymer Nanocomposites Based on Functionalized Carbon Nanotubes.," *Progress in polymer science*, vol. 35, pp. 837-867, 2010.
- [114] V. V. Pokropivnyi, "Non-Carbon Nanotubes (Review). Part 3. Properties and applications.," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 41, pp. 123-135, 2002.
- [115] H. Koerner, *et al.* (2004) Remotely Actuated Polymer Nanocomposites-stress-recovery of Carbon-nanotube-filled Thermoplastic Elastomers. *Nature Materials*. 115-120.
- [116] B. Dietsch and T. Tong, "A Review - Features and Benefits of Shape Memory Polymers (SMPs).," *Journal of advanced materials*, vol. 39, pp. 3-12, 2007.
- [117] S. Chaterji, *et al.*, "Smart Polymeric Gels: Redefining the limits of biomedical devices.," *Progress in Polymer Science*, vol. 32, pp. 1083-1122, 2007.
- [118] A. D. Lantada, "Metodología para el Desarrollo de Dispositivos Médicos Basados en el Empleo de Polímeros Activos como Sensores y Actuadores.," Doutorado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2009.
- [119] A. Lendlein and R. Langer. (2002) Biodegradable, Elastic Shape-Memory Polymers for Potential Biomedical Applications. *Science Magazine*. 1673-1676.

- [120] M. V. Parys. (2012, 02/05/2013). Anticipating the Future...Assessing the Impact. Part 4: Biomimetica and Smart Coatings. *Explore the Amazing World of Textile*, 8.
- [121] SMP-Technologies, "Intelligent Material able to Adjust itself Accordingly to Ensure the Highest Level of Confort & Affinity with Human Body," in http://www2.smptechno.com/en/tech/pdf/smp_tech_e_catalogue.pdf, ed, 2013.
- [122] F. L. Cook, *et al.* (2007, Shape Memory Polymer Fibers for Comfort Wear. *National Textile Center Research Briefs*. Available: <http://www.ntcresearch.org/pdfs/rpts/Bref0607/M05-GT14-07.pdf>.
- [123] M. A. E. Caldas. (2004, Estudos de revisão de literatura: fundamentação e estratégia metodológica. *Hucitec*, São Paulo.
- [124] S. L. P. Tang and G. K. Stylios, "An Overview of Smart Technologies for Clothing Design and Engineering.," *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 18, pp. 108-128, 2006.
- [125] N. Taís and R. Fangueiro, "Design de Stents Híbridos Entrelaçados.," Mestrado, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2009.
- [126] Y. Y. F. Chan and G. K. Stylios, "Designing Aesthetic Attributes with Shape Memory Alloy for Woven Interior Textiles.," presented at the INTEDEC 2003 - Fibrous Assemblies at the Design and Engineering Interface, Edimburgh, 2003.
- [127] S. Getters, "SmartFlex.," vol. 1, S. G. Group, Ed., ed: Saes Getters Group, 2007.
- [128] M. M. GmbH, "in *Info Sheet - 13 - NiTiNol Alloy Types, Conditions and Surfaces*". <http://memry.com/products-services/material/sheet>, Ed., ed, 2009.
- [129] H. Buckle and J. Pollitt, "16—An Instrument for Measuring the Coefficient of Friction of Yarns Against Other Materials.," *Journal of the Textile Institute Transactions*, vol. 39, pp. T199-T210, 1948/06/01 1948.
- [130] P. J. Blau, *Friction Science and Technology: From concepts to applications*: CRC PressINC, 2009.
- [131] P. J. Blau, "Friction Science and Technology : From concepts to applications," ed: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2009, p. 67.
- [132] G. B. Kilic and V. Sölar, "Frictional Properties of Cotton-Tencel Yarns Spun in Different Spinning Systems.," *Textile Research Journal*, vol. 82, pp. 755-765, December 1, 2012 2012.
- [133] A. C. Broega, "Contribuição para a Definição de Padrões de Conforto de Tecidos Finos de Lã.," Doutorado, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2007.
- [134] F. T. Peirce, "5—the geometry of cloth structure," *Journal of the Textile Institute Transactions*, vol. 28, pp. T45-T96, 1937.
- [135] M.-M. GmbH, "Selected Properties of NiTi-based Alloys.," in *Info Sheet - 4* vol. 1, ed: http://www.memory-metalle.de/html/03_knowhow/pdf/mm_04_properties_e.pdf, 2009.
- [136] M. Metalle, "Shape Setting of Nitinol.," in *Info Sheet - 2*, M. Metalle, Ed., ed, 2009.

-
- [137] R. DesRoches and M. Delemont, "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys," *Engineering Structures*, vol. 24, pp. 325-332, 2002.
- [138] M. Dolce and D. Cardone, "Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43, pp. 2657-2677, 2001.
- [139] S. Kim, *et al.*, "Micro artificial muscle fiber using niti spring for soft robotics," in *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 2009, pp. 2228-2234.
- [140] F. F. P. d. Cristo, "A influência da estrutura e da cor na protecção de malhas aos raios ultravioletas," Mestrado, Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Guimarães, 2006.
- [141] K. Dimitrovski, "Influence of Weave and Weft Characteristics on Tensile Properties of Fabrics.," *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 16, p. 67, 2008.
- [142] R. Mishra, *et al.*, "Modelling and Simulation of 3D Orthogonal Fabrics for Composite Applications.," 2012.
- [143] M. Filleul and L. Jordan, "Torsional Properties of Ni-Ti and Copper Ni-Ti Wires: The effect of temperature on physical properties.," *The European Journal of Orthodontics*, vol. 19, pp. 637-646, 1997.
- [144] M. Clark and G. Krimmel, "Lymphoedema and the construction and classification of compression hosiery," in *Compression hosiery in lymphoedema*, B. Medical, Ed., ed: BSN Medical, 2006.
- [145] S. Technolog, "Text Equipment Catalogue Supplement," in *2012*, S. Technology, Ed., ed. Northamptonshire, UK: Satra Technology, 2012, p. 1.
- [146] A. Coull, *et al.*, "Best Practice Statement for Compression Hosiery.," *Wounds UK*, vol. 1, p. 70, 2005.
- [147] L. G. Reid Jr, "Multilayer Compression Stocking System and Method.," 2003.